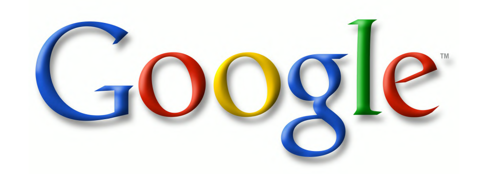
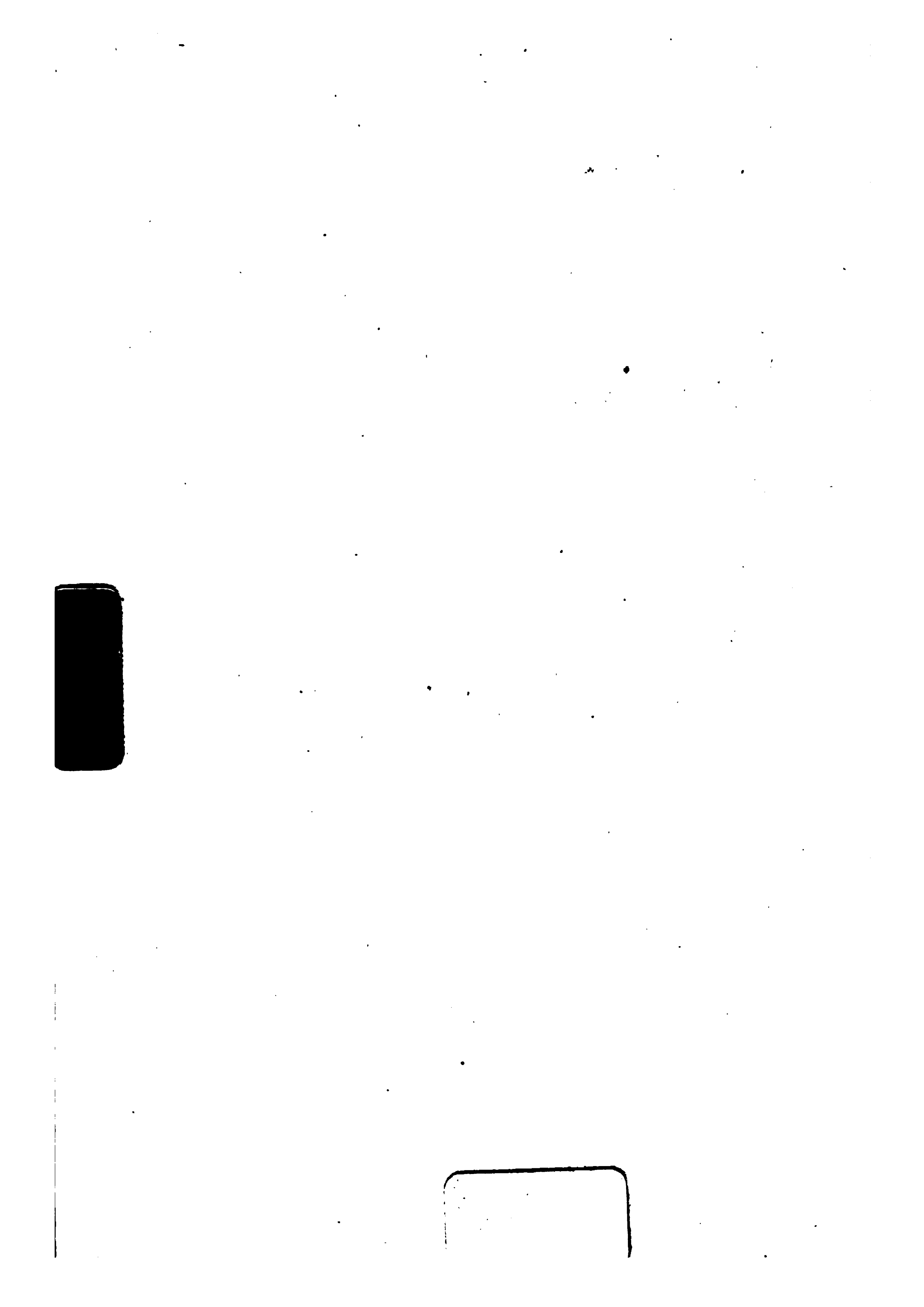
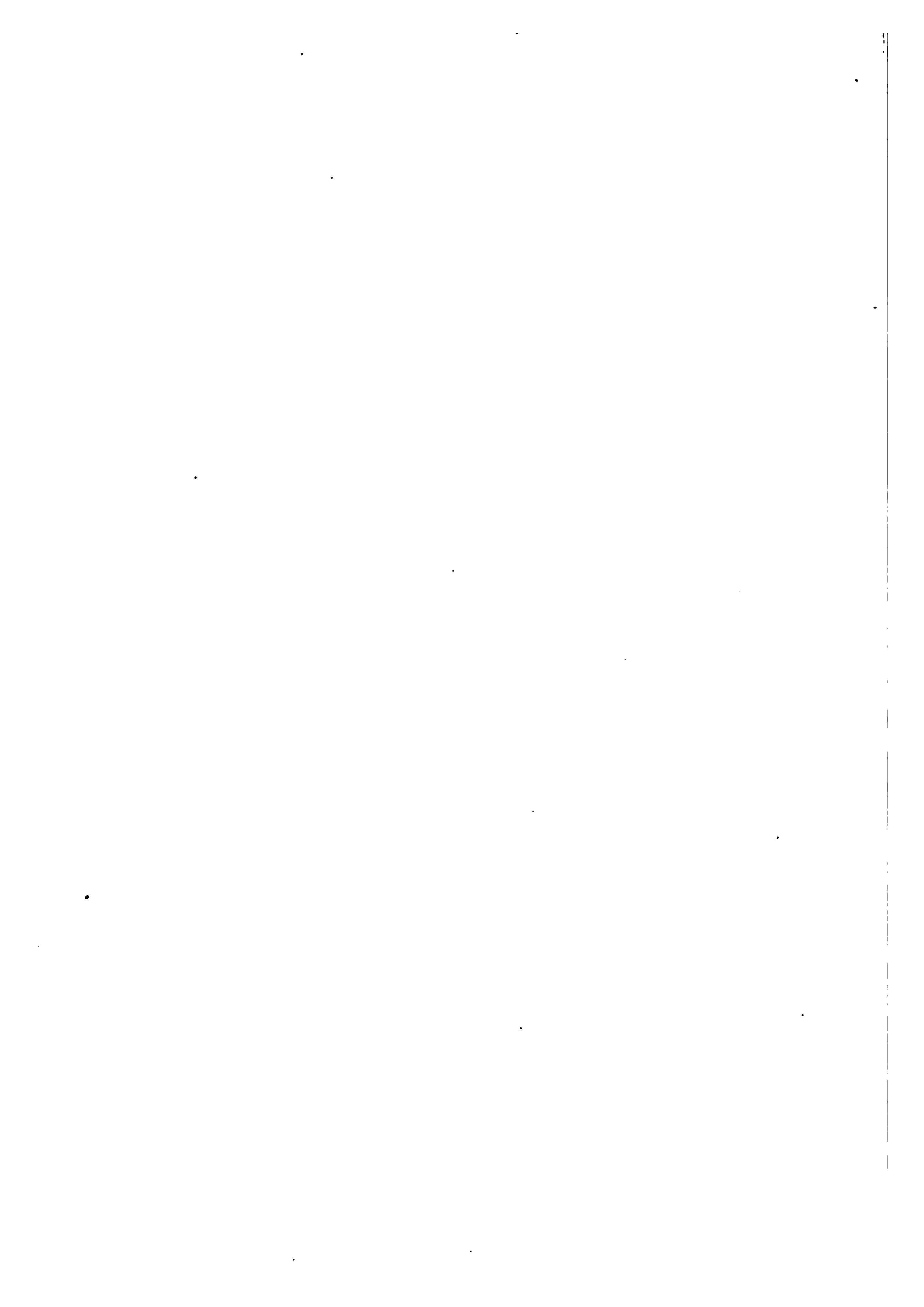
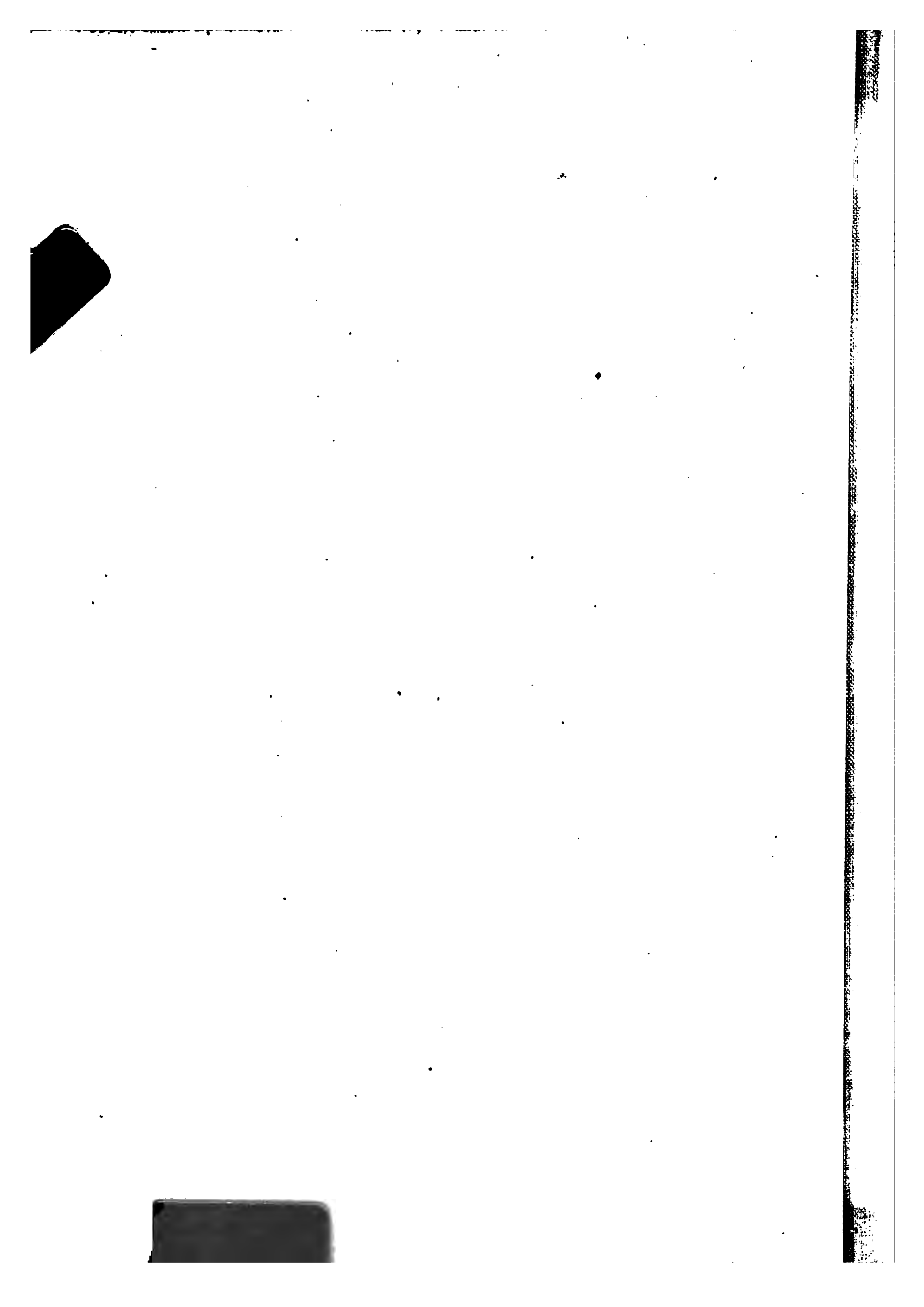












# Handbuch

der

# Elektrotechnik

bearbeitet von

Professor Dr. **H. Ebert,** München. — Ingenieur **H. Eisler,** Wien. — Oberingenieur Dr. **O. Feuerlein,** Charlottenburg. — Professor Dr. **C. Heinke,** München. — Direktor **R. O. Heinrich,** Berlin. — Ingenieur **J. Jonas,** Köln. — Oberingenieur **F. Jordan,** Bremen. — Professor Dr. **J. Kollert,** Chemnitz. — Chefelektriker Dr. **F. Niethammer,** Berlin. — Oberingenieur **Karl Pichelmayer,** Wien. — Ingenieur Dr. **M. Reithoffer,** Wien. — Ingenieur **F. Ross,** Wien. — Direktor **E. Schulz,** Magdeburg. — Direktor Dr. **E. Sieg,** Kalk bei Köln. — Professor Dr. **J. Teichmüller,** Karlsruhe, u. a.

herausgegeben von

**Dr. C. Heinke**

Professor der Elektrotechnik an der technischen Hochschule in München.

**Neunter Band:**

## Elektromotoren
## und
## elektrische Arbeitsübertragung

von

**F. Niethammer** und **E. Schulz**

**Leipzig**

Verlag von S. Hirzel

1901.

# Elektromotoren

und

# elektrische Arbeitsübertragung

von

**F. Niethammer** und **E. Schulz**

Mit 356 Abbildungen

**Leipzig**
Verlag von S. Hirzel
1901.

Druck von Fischer & Wittig in Leipzig.

# 1. Abteilung.

---

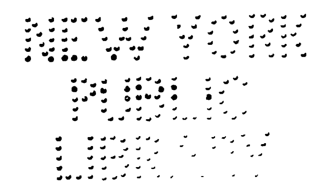
## Elektromotoren
## für Gleich- und Wechselstrom

bearbeitet

von

**Dr. Fritz Niethammer**
Chefelektriker

Mit 279 Abbildungen.



# Vorwort.

Die Gesichtspunkte, die mich bei Abfassung dieses Bandes leiteten, waren dieselben, wie ich sie im Vorwort zu Band IV des Handbuches ausgesprochen habe.

Über die Theorie und Berechnung der Dreh- und Wechselstrommotoren liegen äusserst zahlreiche und umfangreiche Veröffentlichungen vor. Man kann jedoch kaum sagen, dass dieses Gebiet zu einem abgerundeten Abschluss gekommen sei. Es ist deshalb wohl begreiflich, dass der Abschnitt über Ein- und Mehrphasenmotoren dem Umfange nach den grösseren Teil dieses Bandes bildet.

Den verschiedenen elektrotechnischen Firmen, die mich durch Überlassung von Zeichnungen und Photographien in der Ausarbeitung der besonders wichtigen Kapitel über „Beispiele moderner Motoren" so wesentlich unterstützten, sage ich an dieser Stelle meinen besonderen Dank.

Zu weiterem Studium und zur Ergänzung empfehlen sich:


Arnold: Die Ankerwicklungen.
„ Konstruktionstafeln.
Fischer-Hinnen: Die Gleichstrommaschine.
Grawinkel & Strecker: Hilfsbuch der Elektrotechnik.
Jackson: Text book on Electro-Magnetism. 2 Bde.
Kapp: Die Dynamomaschine.
„ Elektrische Kraftübertragung.
„ Elektromechanische Konstruktionen.
Kittler: Handbuch der Elektrotechnik.
Martin & Wetzler: The electric Motor.
Martin: Nikola Teslas Untersuchungen über Mehrphasenströme.
Niethammer: Elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen.
Parshal & Hobart: Electric Generators.
Rössler: Die Gleichstrommotoren.
Steinmetz: Alternating Current Phenomena.

S. Thompson: Dynamo-elektrische Maschine.
„ Mehrphasige Ströme.
„ Der Elektromagnet.
Uppenborn: Kalender für Elektrotechniker.
Voit: Sammlung elektrotechnischer Vorträge, Bd. II, Heft 1 (Heyland).
Wiener: Dynamo-electric machines.

Zeitschriften (zehn bis fünfzehn letzte Jahrgänge, zum Teil noch früher):

Annalen der Physik, Leipzig.
Bull. de la Soc. intern. des Electriciens, Paris.
Eclairage électr., Paris.
Electrician, London.
Electrical Review, New-York.
„ „ London.
Electrical World, New-York.
Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin (E. T. Z.).
Engineering, London.
Industrie électr., Paris.
Lumière électr., Paris.
Nuovo Cimento.
Patentschriften (deutsche, englische, amerikanische).
Trans. Am. Inst. El. Eng.
Trans. Brit. Inst. El. Eng.
Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien.
„ „ „ und Maschinenbau, Potsdam.
„ des Vereins Deutscher Ingenieure (Z. V. D. I.).

Berlin, im März 1901.

Dr. Niethammer.

# Inhaltsverzeichnis.

## A. Gleichstrommotoren.

Seite

I. Geschichtliches . . . . . 1
§ 1. Älteste Motortypen . . . . . 1
§ 2. Neuere Motoren . . . . . 2
§ 3. Kraftübertragung . . . . . 3
II. Theorie . . . . . 3
a) Allgemeines . . . . . 3
§ 4. Motor. Umkehr der Dynamo . . . . . 3
b) Grundbeziehungen . . . . . 4
§ 5. Gegen-EMK. Tourenzahl . . . . . 4
§ 6. Drehmoment . . . . . 4
c) Wirkungsgrad . . . . . 7
§ 7. Elektrischer Wirkungsgrad . . . . . 7
§ 8. Totaler Wirkungsgrad. Verluste . . . . . 8
d) Ankerrückwirkung und Funkenbildung . . . . . 11
§ 9. Ankerrückwirkung . . . . . 11
§ 10. Funkenbildung . . . . . 12
e) Volumen, Gewicht, Tourenzahl . . . . . 14
§ 11. Dimensionsformeln . . . . . 14
§ 12. Tourenzahl . . . . . 15
f) Weitere charakteristische Konstanten . . . . . 16
§ 13. Induktionen . . . . . 16
§ 14. Stromdichte . . . . . 16
g) Die verschiedenen Arten von Gleichstrommotoren . . . . . 17
α) Serienmotor . . . . . 17
§ 15. Serienmotor . . . . . 17
β) Nebenschlussmotor . . . . . 20
§ 16. Nebenschlussmotor . . . . . 20
§ 17. Elektrodynamisches Paradoxon . . . . . 21
§ 18. Nebenschlussmotoren von Sengel & Sayers . . . . . 21
γ) Compoundmotor . . . . . 22
§ 19. Compoundmotor für konstante Touren . . . . . 22
§ 20. Compoundmotor für grosses Moment . . . . . 23
h) Drehrichtung . . . . . 23
§ 21. Drehsinn . . . . . 23
III. Anlasser . . . . . 24
§ 22. Theorie des Anlassers . . . . . 24

Seite

IV. Bremsung . . . . . 27
§ 23. Bremsung auf Widerstand . . . . . 27
§ 24. Bremsung aufs Netz. Gegenstrom . . . . . 28
V. Tourenänderung . . . . . 28
a) Allgemeines . . . . . 28
§ 25. Möglichkeiten einer Tourenänderung . . . . . 28
b) Serienmotor . . . . . 29
§ 26. Tourenregulierung des Serienmotors . . . . . 29
c) Nebenschlussmotor . . . . . 31
§ 27. Tourenänderung des Nebenschlussmotors . . . . . 31
VI. Beispiele moderner Gleichstrommotoren . . . . . 31
§ 28. Allgemeine E.-G. . . . . . 31
§ 29. Maschinenfabrik Esslingen . . . . . 32
§ 30. Helios . . . . . 32
§ 31. Körting . . . . . 34
§ 32. Kummer . . . . . 35
§ 33. Schuckert . . . . . 36
§ 34. Schwartzkopff . . . . . 42
§ 35. Siemens & Halske . . . . . 42
§ 36. Union . . . . . 43
§ 37. Ganz & Co. . . . . . 44
§ 38. Kolben & Co. . . . . . 47
§ 39. Brown, Boveri & Co. . . . . . 48
§ 40. Cie de l'Ind. El. . . . . . 49
§ 41. Oerlikon . . . . . 51
§ 42. J. J. Rieter & Co. . . . . . 51
§ 43. Farcot. Gramme . . . . . 51
§ 44. Verschiedene Motoren . . . . . 53
§ 45. Bergmann-Motoren . . . . . 55
§ 46. Übliche Motorformen . . . . . 58

## B. Ein- und mehrphasige Wechselstrommotoren.

I. Einteilung . . . . . 67
§ 47. Einteilung der Wechselstrommotoren . . . . . 67
II. Historisches . . . . . 67
§ 48. Geschichte des Synchronmotors . . . . . 67
§ 49. Erste Anfänge der Induktionsmotoren . . . . . 68
§ 50. Ferraris. Tesla. Neuzeit . . . . . 68
III. Synchronmotoren . . . . . 72
a) Allgemeines . . . . . 72
§ 51. Wirkungsweise des Synchronmotors . . . . . 72
b) Anlaufsvorrichtungen für Synchronmotoren . . . . . 72
§ 52. Hilfsmotor. Anlassen durch Gleichstrom . . . . . 72
§ 53. Vorrichtungen im Synchronmotor selbst . . . . . 73
c) Allgemeine Theorie . . . . . 75
§ 54. Theorie auf Grund des Selbstinduktionskoeffizienten . . . . . 75
§ 55. Theorie auf Grund der Ampèrewindungen . . . . . 78
§ 56. Umformer . . . . . 79
§ 57. Phasenumformer . . . . . 81
d) Analytische Theorie . . . . . 81
§ 58. Theorie nach Ossanna . . . . . 81
§ 59. Überlastungsfähigkeit . . . . . 82
e) Verschiedene Betriebsverhältnisse . . . . . 83
§ 60. Variable Erregung . . . . . 84

Seite

§ 61. $J$ variabel . . . . . 85
§ 62. Maximaler Wirkungsgrad . . . . . 86
§ 63. Grenzwerte von $E$ und $J$ . . . . . 87
§ 64. Analytische Theorie von Steinmetz . . . . . 87
f) Vergleich des Synchronmotors mit anderen Motorgattungen . . . . . 89
§ 65. Vor- und Nachteile des Synchronmotors . . . . . 89
g) Der Synchronmotor als Phasenregler . . . . . 90
§ 66. Der Phasenregler nach Berg . . . . . 90
IV. Mehrphasige Induktionsmotoren . . . . . 93
a) Allgemeines . . . . . 93
§ 67. Wirkungsweise des Asynchronmotors . . . . . 93
b) Grundbeziehungen . . . . . 93
§ 68. Drehmoment . . . . . 93
§ 69. Grundgleichungen . . . . . 94
§ 70. Ampèrewindungen . . . . . 95
§ 71. Koeffizienten . . . . . 95
§ 72. Drehfelder . . . . . 97
c) Theorie von Dr. Behn-Eschenburg . . . . . 99
§ 73. Theorie von Dr. Behn . . . . . 99
§ 74. Anwendung der Theorie . . . . . 100
d) Theorie von Steinmetz . . . . . 104
§ 75. Theorie von Steinmetz . . . . . 104
§ 76. Drehmoment . . . . . 105
§ 77. Anlauf . . . . . 106
§ 78. Normaler Lauf . . . . . 108
e) Graphische Methoden . . . . . 108
§ 79. Diagramm von Heyland . . . . . 108
§ 80. Diagramm von Blondel . . . . . 112
§ 81. Vollständiges Diagramm . . . . . 113
§ 82. Induktionsgenerator . . . . . 114
f) Beziehungen für die Schlüpfung, für $(\cos\varphi)_{max}$. Überlastungsfähigkeit . 115
§ 83. Schlüpfung . . . . . 115
§ 84. Maximaler Leistungsfaktor . . . . . 115
§ 85. Überlastungsfähigkeit . . . . . 116
g) Wirkungsgrad . . . . . 117
§ 86. Wirkungsgrad allgemein . . . . . 117
§ 87. Leerverluste . . . . . 118
h) Leistung in Abhängigkeit der Abmessungen . . . . . 118
§ 88. Formel für $d^2 l$ . . . . . 118
§ 89. Verhältnis $\frac{l}{d}$ . . . . . 119
i) Betriebskurven . . . . . 119
§ 90. Kurven für $M$, $J_1$, $\cos\varphi$, $s$ etc . . . . . 119
k) Streuung . . . . . 127
§ 91. Faustregeln . . . . . 127
§ 92. Genauere Formeln . . . . . 127
§ 93. Bestimmung von $J_\mu$ und $J_k$ . . . . . 130
§ 94. Die Streukoeffizienten $\nu$, $\sigma$, $\tau$ . . . . . 132
§ 95. Streukoeffizient nach Behrend und Heubach . . . . . 133
l) Besondere Ankerwicklungen . . . . . 133
α) Kurzschlussanker . . . . . 133
§ 96. Einteilung der Kurzschlussanker . . . . . 133
§ 97. Theorie des Kurzschlussankers . . . . . 134
β) Stufenanker und Gegenschaltung . . . . . 135
§ 98. Stufenanker der A. E.-G. und von Boucherot . . . . . 135

Seite

§ 99. Doppelmotor von Bradley und Boucherot . . . . . . . . . 136
§ 100. Gegenschaltung nach Siemens & Halske; Schaltungen nach Niethammer und Déri . . . . . . . . . . . . . . . . . 136
γ) Impedanzanlasser . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 138
§ 101. Impedanzanlasser . . . . . . . . . . . . . . . . . 138
δ) Kaskadenschaltung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 141
§ 102. Theorie der Kaskadenschaltung nach Steinmetz . . . . . . 141
§ 103. Graphische Theorie . . . . . . . . . . . . . . . . 143
ε) Einachsige Schaltung . . . . . . . . . . . . . . . . . . 145
§ 104. Einachsige Schaltung . . . . . . . . . . . . . . . 145
m) Tourenänderung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 147
§ 105. Polumschaltung . . . . . . . . . . . . . . . . . . 147
n) Anlasser und Bremsung . . . . . . . . . . . . . . . . . . 148
§ 106. Primäre Anlasser . . . . . . . . . . . . . . . . . 148
§ 107. Ankeranlasser . . . . . . . . . . . . . . . . . . 148
§ 108. Anlasser von Siemens & Halske und der Gen. El. Co. . . . . 149
§ 109. Bremsung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 149
o) Theorie nach Fischer-Hinnen . . . . . . . . . . . . . . . 149
§ 110. Wicklungsarten . . . . . . . . . . . . . . . . . . 149
§ 111. Koeffizienten . . . . . . . . . . . . . . . . . . 150
§ 112. Streukoeffizienten . . . . . . . . . . . . . . . . 151
§ 113. Reibungsverluste . . . . . . . . . . . . . . . . . 152
§ 114. Anlassen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 152
§ 115. Regulierung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 154
§ 116. cos $\varphi$, Ampèredrähte, Umlaufsgeschwindigkeit . . . . . . 154
p) Verschiedene charakteristische Grössen . . . . . . . . . . . 155
§ 117. Induktion . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 155
§ 118. Nutenform . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 155
§ 119. Stromdichte . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 155
§ 120. Luftspalt . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 155

V. Einachsiger Induktionsmotor . . . . . . . . . . . . . . . 156
a) Allgemeines . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 156
§ 121. Drehfeld des Einphasenmotors . . . . . . . . . . . . 156
§ 122. Erregerstrom . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 156
b) Betriebskurven . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 156
§ 123. cos $\varphi$ und Wirkungsgrad . . . . . . . . . . . . . . 156
§ 124. Betriebskurven . . . . . . . . . . . . . . . . . . 157
c) Theorie des Einphasenmotors . . . . . . . . . . . . . . . 159
α) Verschiedenes . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 159
§ 125. Heyland. Behrend . . . . . . . . . . . . . . . . . 159
β) Theorie von Heubach . . . . . . . . . . . . . . . . . . 160
§ 126. Heubach . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 160
§ 127. Grundbeziehungen nach Heubach . . . . . . . . . . . 162
γ) Theorie nach Eichberg . . . . . . . . . . . . . . . . . 163
§ 128. Eichberg . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 163
δ) Theorie nach Görges . . . . . . . . . . . . . . . . . . 166
§ 129. Görges . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 166
§ 130. Vergleich von Ein- und Mehrphasenmotoren . . . . . . . 167
d) Anlassvorrichtungen . . . . . . . . . . . . . . . . . . 167
§ 131. Allgemeines über Anlassvorrichtungen . . . . . . . . 167
§ 132. Anlassvorrichtung von Oerlikon . . . . . . . . . . . 168
§ 133. Anlassvorrichtung der Gen. El. Co. . . . . . . . . . . 169
§ 134. Siemens & Halske . . . . . . . . . . . . . . . . . 169
§ 135. Besondere Motorwicklungen . . . . . . . . . . . . . 169

Seite

§ 136. Ferraris & Arnò . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 170
§ 137. Steinmetz . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 171
VI. Induktionsmotoren mit Kollektor . . . . . . . . . . . . . . 172
§ 138. Kollektormotoren . . . . . . . . . . . . . . . . . . 172
§ 139. Theorie . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 173
VII. Konduktionsmotoren . . . . . . . . . . . . . . . . . . 174
§ 140. Konduktionsmotoren (Serienmotor) . . . . . . . . . . . 174
VIII. Reaktionsmotoren. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 176
§ 141. Hysteresismotor . . . . . . . . . . . . . . . . . . 176
§ 142. Theorie der Reaktionsmotoren . . . . . . . . . . . . . 176
§ 143. Schirmspulen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 177
IX. Beispiele moderner Wechsel- und Drehstrommotoren . . . . 178
§ 144. A. E.-G. Berlin . . . . . . . . . . . . . . . . . . 178
§ 145. Helios . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 179
§ 146. Kummer . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 180
§ 147. Schuckert . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 180
§ 148. Siemens & Halske . . . . . . . . . . . . . . . . . 180
§ 149. Union . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 189
§ 150. Ganz & Co. . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 189
§ 151. Kolben . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 193
§ 152. Alioth . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 196
§ 153. Brown, Boveri & Co. . . . . . . . . . . . . . . . . 196
§ 154. Oerlikon . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 202
§ 155. Westinghouse Co. . . . . . . . . . . . . . . . . . 211
§ 156. Breguet. Stanley. Wagner. Fischer-Hinnen . . . . . . . . 212

## C. Thermomagnetische Motoren.

§ 157. Thermomagnetische Motoren . . . . . . . . . . . . . . 218

# Symbole.

Ausser den Symbolen, die in Bd. IV, Seite XVI zusammengestellt sind, füge ich hier an:

$2a$ = Zahl paralleler Kreise.
$AS$ = Ampèredrähte pro $c$ Umfang.
$J_a$ = Ankerstrom.
$J_\mu$ = Magnetisierungsstrom.
$M$ = Drehmoment.
$n_s$ = Schlüpfung.
$\nu$ = Streukoeffizient ($> 1$).
$P$ = Zugkraft.
$s$ = Schlüpfung in Prozenten.
$\sigma$ = Streukoeffizient (gesamter) } ($< 1$).
$\tau$ = Streukoeffizient } ($< 1$).
$U$ = Überlastungsfaktor.
$x$ = Reaktanz.
$Y$ = Admittanz.
$Z$ = Totalleiter (bei Gleichstrom).
$\mathfrak{z}$ = Impedanz.

---

## Druckfehlerverzeichnis.

Seite 5. Erste Zeile von oben lies $\frac{\pi u}{30}$ statt $\frac{\pi n}{30}$.
„ 10. Dritte, vierte und achte Zeile von unten streiche 9.
„ 13. Gleichung 12 lies $>$ statt $<$.
„ 41. Der Motor Fig. 47 hat vertikal zu stehen.
„ 99 ff. Ist $\sigma$ stets durch $\sigma'$ zu ersetzen (Theorie von Dr. Behn).
Fig. 73a—d. Füge bei: „Vollbahnmotor von Ganz & Co.“
„ 243a. Füge bei: „750 PS-Motor von Ganz & Co.“

# A. Gleichstrommotoren.

---

## I. Geschichtliches.[1])

§ 1. Älteste Motortypen.

Die erste Grundlage für den Elektromotor wurde durch FARADAY mit der Entdeckung der elektromagnetischen Drehung (1821) geschaffen. STURGEONS und VON BARLOWS Scheibenrad (1823) bestand (Fig. 1) aus einer Metallscheibe, die zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten rotiert. Die Stromzuleitung erfolgt einerseits an der Scheibenachse, andererseits am Scheibenradumfang. Es ist dies, ebenso wie FARADAYS Scheibe, ein Vertreter der Homopolarmaschinen. Von JOULE (1838) rühren verschiedene Motortypen her, im selben Jahre erwähnt JACOBI eine vielpolige Konstruktion. Durch Unterstützung des Zaren war es JACOBI schon im Jahre 1834 möglich, ein Newaboot mit einem durch Daniel- bezw. Grove-Zellen gespeisten elektromagnetischen Motor zu betreiben. Derselbe bestand aus zwei Reihen von Elektromagneten, jede Reihe zu vier Stück achsial angeordnet. Eine Reihe stand fest, die andere war drehbar, der Strom wurde pro Umdrehung achtmal umgekehrt. 1838/39 baute der Schotte R. DAVIDSON eine elektrisch betriebene Lokomotive und eine ebensolche Drehbank: Ein rotierendes Rad trug die Eisenanker für acht feststehende Elektromagnete. Der wirklich beachtenswerte Motor des Holländers ELIAS (1842) bestand aus zwei konzentrischen Eisenringen mit einander zugekehrten Polansätzen, zwischen denen die Wicklungen aufgebracht waren. Der Strom des inneren Ringes wurde kommutiert. Der Motor von FROMENT (1845) gleicht einem Schaufelrad, dessen Schaufeln durch aussenstehende, jeweils kommutierte Pole bethätigt werden.[2])

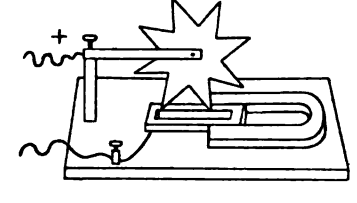



Fig. 1.

---

1) Ausführliches über die Geschichte des Elektromotors findet sich in „The electric motor by MARTIN and WETZLER“.

2) Von amerikanischen Erfindern von Motoren, die prinzipiell wie die beschriebenen aus zwei Elektromagnetsätzen oder aus einem Satz Elektromagneten (bezw. permanenter Magnete) und einem Satz Eisenanker bestanden, führe ich folgende Namen aus dem citierten Werke an: DAVENPORT (1837, Patentanspruch: applying magnetic and electromagnetic power as a moving principle for machinery), N. WALKLY (1838), S. STIMPSON (1838), T. COOK (1840), J. H. LILLIE (1850), J. NEFF (1851), TH. C. AVERY, GUSTIN (1852, schwingender Motor), PAGE (1850 für eine Lokomotive von 10 PS), 1847 führte M. G. FARMER

Eine Type, die heutzutage völlig veraltet ist, wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts öfters gebaut, nämlich schwingende Motoren: Professor HENRY (1831) liess einen Hebel durch einen Elektromagneten, der abwechselnd erregt und unterbrochen wurde, hin- und herbewegen. In DAL NEGROS Motor (1832) schwingt ein Stahlstab, der eine Kurbel dreht, zwischen den Polen eines Elektromagneten. Dr. SCHULTHESS-Zürich sowie BOTTO bauten um dieselbe Zeit ähnliche Konstruktionen. PAGE (1850) verwendet Solenoide mit auf- und abwärtsbewegten Eisenkernen. BOURBOUZE baute einen Apparat, der einer alten Balancier-Dampfmaschine sehr gleicht; vier Solenoide entsprechen mit ihren Eisenkernen den Dampfcylindern und der Schieber arbeitet als Stromwender. Auch RITCHIE, JACOBI, DAVENPORT, WHEATSTONE, DU MONCEL, FROMENT und PACINOTTI beschäftigten sich mit schwingenden Motoren.

Von LENZ (1838) stammt die Erkenntnis, dass der Motor die Umkehr der Dynamo ist, die Thatsache wurde allerdings erst viel später allgemein anerkannt.

JACOBI — und vielleicht andere vor ihm — hatten gefunden, dass ein Elektromotor, der gewöhnlich durch Batteriestrom gespeist wurde, beim Lauf eine elektromotorische Gegenkraft — einen Gegenstrom — erzeugt. JOULE gab 1842 an, dass die elektrische Gegenwirkung der Drehgeschwindigkeit und dem Magnetismus proportional ist.

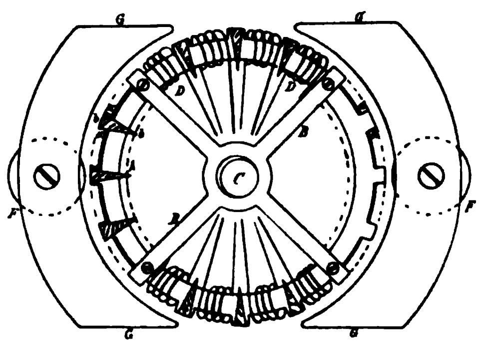


Fig. 2.

Im Jahre 1855 baute W. VON SIEMENS den Doppel-T-Anker, der heute noch häufig für kleine Motoren verwendet wird, obwohl wegen der beschränkten Lamellenzahl (2) die Stromfluktuationen sehr bedeutend sind.

§ 2. Neuere Motoren.

Die älteste Maschine, die dem heute gebauten Gleichstrommotor ziemlich entspricht, wurde im Jahre 1860 von A. PACINOTTI in Florenz gebaut, Wesentlich an derselben ist ein mit Ringwickelung versehener Eisenring (Fig. 2 [1]), der zwischen einem hufeisenförmigen Elektromagneten rotiert. Letzterer wurde durch eine Batterie gespeist. Die sechzehn Drahtspulen des Ankers sind durch hölzerne Treibstützen gegen Verschiebung gesichert. Der Kommutator besteht aus zwei Reihen von je acht Messingstücken, die durch Holzzähne von einander isoliert sind. Jedes Segment ist mit dem Anfang einer und dem Ende der nächstfolgenden Spule verbunden.

Der moderne Gleichstrommotor ist mit der Erfindung der dynamoelektrischen Maschine durch W. VON SIEMENS und GRAMME (Ende der sech-

---

und 1851 TH. HALL eine elektromagnetische Lokomotive vor, L. STEIN (1854, Ventilatormotor), M. M. VERGNES, YEISER (1858, schwingender Motor), L. H. MC. CULLOUGH (1867, vertikaler Vibrator), C. J. B. GAUME (1867, Feld und Anker rotieren entgegengesetzt), W. WICKERSHAM (1868, endlose elektromagnetische Kette), CH. T. MASON und A. J. B. DEMORAT. Diese sämtlichen Konstruktionen sind in amerikanischen Patentschriften niedergelegt.

1) KITTLER, Handbuch der Elektrotechnik I, 2. Aufl., Seite 820. Il nuovo Cimento 1864, wo von PACINOTTI die Umkehrbarkeit der Dynamo als Motor ausgesprochen ist.

ziger Jahre) in seinen Grundzügen gegeben. Seine Vervollkommnung geht Hand in Hand mit derjenigen der Gleichstromdynamo. Der Gleichstrommotor bezw. die elektrische Kraftübertragung war überhaupt erst lebensfähig, als geeignete Stromerzeuger zur Verfügung standen. Die Pariser Ausstellung 1881 führte eine Menge neuer Elektromotoren vor Augen und von da ab geht die industrielle Entwickelung des Elektromotors raschen Schrittes voran.

§ 3. Kraftübertragung.

Die Idee der elektrischen Kraft- oder Arbeitsübertragung ist ziemlich alt, schon 1855 äusserte sich SIEMENS darüber. Die erste nennenswerte Übertragung mit Dynamo- und Elektromotor ist wohl diejenige von FONTAINE[1]) & BREGUET auf der Wiener Ausstellung (1873). 1877 verwendeten französische Offiziere zwei Grammemaschinen zu einer kleinen Kraftübertragung, 1879 pflügten FÉLIX und CHRÉTIEN elektrisch. 1880 sprach M. DEPREZ die Theorie aus: Bei der elektrischen Übertragung ist der Wirkungsgrad unabhängig von der Entfernung. Im Jahre 1879 stellte SIEMENS in Berlin eine elektrische Eisenbahn aus; die SIEMENSschen Bahnversuche vom Jahre 1867 waren wegen zu grosser Erwärmung der Maschinen verunglückt. In Amerika wurden fast gleichzeitig (1880) Patente auf elektrische Bahnen von ST. D. FIELD, Dr. W. SIEMENS und TH. A. EDISON eingereicht. In München übertrug MARCEL DEPREZ im Jahre 1882 bei 850 Volt Motorspannung mit 38 % Wirkungsgrad $^1/_2$ PS auf 57 km; in Grenoble (Comptes Rendus 1883) auf 14 km 10 PS bei 2000 Volt. Auf der gleichen Ausstellung in München befand sich eine Kraftübertragung für einen Dreschmaschinenantrieb von SCHUCKERT und eine zum Betrieb einer Molkerei mittelst eines EDISON *Z*-Motors. MARCEL DEPREZ benutzte 1885 für eine Kraftübertragung von etwa 40 PS zwischen Creil und Paris 6000 Volt Klemmenspannung und erreichte circa 50 % Gesamtwirkungsgrad. Der Motor war 6polig, während der Generator 8 Pole hatte. Die Magnete waren in zwei Reihen aufgeschraubt, innerhalb derselben liefen zwei Gramme-Ringe. Die Lamellenzahl des Kommutators war 231.[2])

Trotzdem im letzten Jahrzehnt dem Gleichstrommotor im Drehstrommotor ein heftiger Konkurrent erwachsen ist, behauptet jener doch noch ein weites Feld und es werden auch jetzt noch mindestens soviel Pferdestärken in Gleichstrommotoren wie in Drehstrommotoren installiert. Die bequeme Regulierfähigkeit, die Abwesenheit des Leistungsfaktors cos $\varphi$ und die günstigen Anzugsbedingungen des Gleichstrommotors sowie die grössere Vertrautheit mit allem Motorzubehör und die bessere Durcharbeitung dieses Zubehörs sind wohl die Hauptursache dafür.

# II. Theorie.

## a) Allgemeines.

§ 4. Motor-Umkehr der Dynamo.

Von den kleinsten Typen abgesehen, die überhaupt nicht als Stromerzeuger gebaut werden, ist es allgemein üblich, die Dynamomaschinen für

1) Die ersten ausführlichen Theorien über die elektrische Kraftübertragung stammen von DEPREZ („Lumière électrique") und FRÖHLICH („Elektrotechnische Zeitschrift").

2) L'Electricien, 15. Juni 1881.

Gleichstrom ohne Änderung auch als Motoren zu verkaufen. Die einzigen erwähnenswerten Abweichungen sind wohl die, dass der Draht auf den Erregerspulen bei Motoren etwas dünner und die Erregerwindungszahl grösser ist, sowie dass die Bürstenstellung geändert wird. Es ist deshalb einleuchtend, dass die Theorie der Gleichstromdynamo mit derjenigen des Gleichstrommotors identisch ist, was bekanntlich in der Wechselstromtechnik nicht in gleichem Masse der Fall ist.

Ein Gleichstrommotor, dem man etwa denselben elektrischen Effekt zuführt, den die Maschine als Dynamo zu leisten imstande wäre, verhält sich bezüglich Funkenbildung, Erwärmung, Wirkungsgrad, Regulierung u. s. w. mindestens ebenso günstig wie die Dynamo, so dass der Hauptsache nach in theoretischer Hinsicht auf Band III verwiesen werden muss.

## b) Grundbeziehungen.

§ 5. Gegen-EMK. Tourenzahl.

Sobald ein Elektromotor mit einer bestimmten Tourenzahl $u$ (pro Minute) läuft, erzeugt er eine EMK $E$, die der Netzspannung bezw. der Klemmenspannung $E_k$ an den Motorklemmen entgegenwirkt. $E$ heisst deswegen **gegenelektromotorische Kraft**. Die Differenz $E_k - E$ überwindet die inneren Widerstände $w$ des Motors und bestimmt also die Stromstärke $J_a$ im Anker[1])

$$J_a = \frac{E_k - E}{w} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (1)$$

$E$ ist wie bei Dynamomaschinen:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{u Z K}{60 \cdot 10^8} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (2)$$

worin $p$ die Polpaarzahl, $Z$ die gesamte Leiterzahl, $K$ die Kraftlinienzahl pro Pol und $2a$ die Zahl der parallelgeschalteten Ankerzweige ist. Aus (2) ergiebt sich die für den Motor wichtige Beziehung für die **Umlaufszahl**

$$\left.\begin{aligned} u &= E \frac{60 \cdot 10^8}{Z \cdot K} \cdot \frac{a}{p} \\ &= (E_k - J_a w) \frac{60 \cdot 10^8}{Z \cdot K} \cdot \frac{a}{p} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots (3)$$

Für die Richtung der Grössen $E_k$, $J_a$, $K$ gilt, dass sie den drei räumlichen Koordinatenachsen entsprechen, die sich durch die drei ersten Finger der **linken Hand**[2]) (Fig. 3) darstellen lassen: der Daumen giebt die Bewegungsrichtung $v$, der Zeigefinger die Kraftlinienrichtung $K$, der Mittelfinger die Stromrichtung $J$.

Fig. 3.

§ 6. Drehmoment.

Da $E$ die durch die Drehung erzeugte Reaktions-EMK ist, so leuchtet ein, dass $E \cdot J$ der mechanisch abgegebenen Leistung $A_m$, die Lagerreibung $A_R$ und die Eisenverluste $A_{H+W}$ eingeschlossen, gleich ist. Bezeichnet man mit $M'$ das ideelle **Drehmoment** in mkg und ist

---

1) Bei Dynamos dagegen ist
$$E - E_k = J_a w.$$

2) Bei Dynamos rechte Hand.

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

die Winkelgeschwindigkeit, so ist, da 1 sec. mkg = 9,81 Watt,

$$A_m = M' \cdot \omega \cdot 9{,}81 = E \cdot J_a \quad \ldots \ldots \quad (4)$$

Zieht man von $J_a$ die Stromstärke $J_R$ für Lagerreibung

$$J_R = \frac{A_R}{E_k}$$

und diejenige $J_H$ für Eisenverlust

$$J_H = \frac{A_H + w}{E_k}$$

ab, so kann man die Nutzstromstärke setzen

$$J = J_a - J_R - J_H.$$

Durch Substitution von $E$ ergiebt sich dann das eigentliche nutzbare Moment

$$\left.\begin{aligned} M = \frac{p}{2\pi \cdot 9{,}81\,a} JZK \cdot 10^{-8} &= \frac{p}{2\pi \cdot 9{,}81\,a} \cdot ZK\left(\frac{E_k - E}{w} - J_R - J_H\right)10^{-8} \\ &= \frac{p}{61{,}6\,a} ZK\left(\frac{E_k - E}{w} - J_R - J_H\right)10^{-8} \end{aligned}\right\} (5)$$

Eine Pferdestärke (PS) ist gleich 75 · 9,81 = 736 Watt; in England ist es allerdings üblich mit 76 · 9,81 = 746 Watt pro 1 HP[1]) zu rechnen.

Setzt man die Leistung in PS gleich $A_p$, so ist

$$M = \frac{30 \cdot 75}{\pi u} A_p = 716 \frac{A_p}{u} = 0{,}975 \frac{A_w}{u} \quad \ldots \ldots \quad (6)$$

Der Ausdruck für das Moment $M$ lässt sich auch noch auf andere Weise[2]) ableiten. Die Kraft $dP$, die ein Leiter von der Länge $l$ und mit dem Strom $di$ in einem Felde von der Dichte $B$ erfährt, ist[3])

$$dP = Bl\,di.$$

---

1) Horse power.

2) Siehe z. B. KAPP, Elektrische Kraftübertragung.

3) Diese Gleichung ist eine Folgerung aus dem BIOT-SAVARTschen Gesetz, wonach die Kraftwirkung $P$ zwischen einem Magnetpol von der magnetischen Masse $m$ auf ein Stromelement $dl$ bei einer gegenseitigen Entfernung $r$ und bei dem Winkel $\varphi$ zwischen $r$ und $dl$ ist

$$P = \frac{m \cdot i \cdot dl \sin \varphi}{r^2}.$$

Da

$$\frac{m}{r^2} = B$$

und $\sin \varphi = 1$, so wird

$$P = Bi\,dl.$$

Man denkt sich nun die ganze Wicklung auf dem Motorumfang als eine Stromschicht, deren Intensität pro Centimeter Umfang ist

$$\frac{Zi}{\pi D},$$

wenn $Z$ die gesamte Leiterzahl, $i$ der Strom pro Leiter und $D$ der Ankerdurchmesser ist. Also wird

$$dP = Bl \frac{Zi}{\pi D} da \cdot \frac{D}{2}$$

wenn $da$ ein kleiner Winkelausschnitt der Stromschicht ist. Durch Integration folgt

$$P = \frac{iZK}{\pi D}$$

und das Moment

$$M = PD = \frac{1}{\pi} iZK.$$

Dieser Ausdruck stimmt mit dem angegebenen überein. er ist allerdings in absolutem Masse, nicht wie oben in konventionellem ausgedrückt und nur auf ein Polpaar bezogen, ferner ist

$$i = \frac{J}{2a}.$$

Bezüglich des absoluten Masssystems sei hier eingeschoben, dass

$$1 \text{ kg} = 0{,}981 \cdot 10^6 \text{ Dynen}, \qquad 1 \text{ mkg} = 98{,}1 \cdot 10^6 \text{ Erg},$$

$$1 \text{ sec. mkg} = 98{,}1 \cdot 10^6 \text{ sec. Erg}, \qquad 1 \text{ sec. Erg} = 10^{-7} \text{ Watt},$$

$$1 \text{ Watt} = 0{,}102 \text{ sec. mkg}.$$

ist.

Für Traktionszwecke ist es meist nötig, die Motorleistung nicht aus dem erforderlichen Drehmoment $M$, sondern aus der Zugkraft bezw. aus dem Wagengewicht $G$ in Tonnen und der Steigung $s$ in Prozenten zu berechnen. Der elektrisch zuzuführende Effekt $A$ in Watt ist

$$A = \frac{9{,}81 \cdot v \cdot G \, (S \pm s)}{\left(1 \mp \frac{\eta_r}{100}\right)\left(1 \mp \frac{\eta_m}{100}\right)}$$

falls $v$ in $m_{sec}$ die Fahrgeschwindigkeit, $S = 3$ bis $20$ der Traktionskoeffizient ($S$ beim Anfahren $= \sim 45$, für Anhängewagen weniger als die Hälfte wie eben angegeben), $\eta_r$ der Wirkungsgrad der Übersetzungselemente und $\eta_m$ der Motorwirkungsgrad ist. $+$ gilt für Steigungen, $-$ für Gefälle. Um die zusätzliche Leistung beim Anfahren zu finden, kann man $S \pm s$ ersetzen durch $S \pm s + s'$, wobei

$$s' = c \frac{V}{t},$$

wenn $V$ die Normalgeschwindigkeit in km, $t$ die Anfahrzeit und $c \cong 100$ ist. Für Kurven ist zu $S \pm s$ noch ein Ausdruck von der Form

$$\frac{370}{R - 10}$$

($R$ der Krümmungsradius in $m$) zu fügen.

### c) Wirkungsgrad.

§ 7. Elektrischer Wirkungsgrad.

Nach (4) ist angenähert

$$A_m = E \cdot J_a = \frac{E_k - E}{w} E.$$

Sieht man von allen Verlusten ausser dem im Anker ab, so ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{EJ}{E_k J} = \frac{E}{E_k}.$$

Die Leistung $A_m$ wird ein Maximum, wenn

$$\frac{dA_m}{dE} = 0,$$

d. h. wenn

$$E = \frac{E_k}{2},$$

dann ist[1])

$$(A_m)_{max} = \frac{1}{4} \frac{E_k^2}{w}$$

und

$$\eta = 50\,\%.$$

Dieser Wirkungsgrad würde noch durch weitere Verluste in den Lagern, im Eisen, in der Erregung u. s. w. verringert werden, er ist für praktische Bedürfnisse viel zu niedrig, man wird also einem gegebenen Modell niemals die Leistung $A_{max}$ entnehmen; in der Regel würde die Maschine auch auf die Dauer viel zu heiss werden.

S. Thompson hat den obigen Gedankengang bezüglich des maximalen Wertes von $A_m$ durch ein Diagramm veranschaulicht: Figur 4 stellt ein Quadrat mit den vier Seiten $E_k$ dar. $AF = AG = E$. Der dem ideellen Motor zugeführte Effekt

$$\frac{E_k (E_k - E)}{w}$$

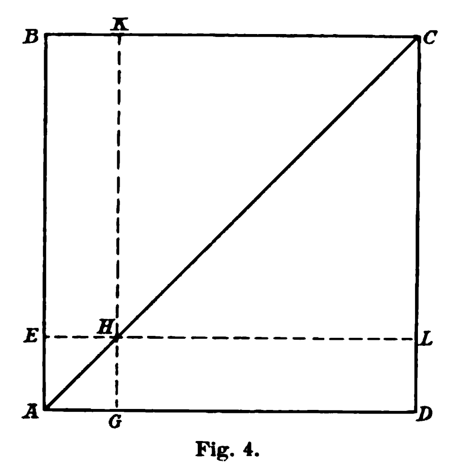



Fig. 4.

ist durch das Rechteck $B\,F\,L\,C$ und die abgegebene Leistung

$$\frac{E (E_k - E)}{w}$$

1) Dieses Gesetz rührt von Jacobi her.

durch das Rechteck $GHLD$ dargestellt. Der Punkt $H$ wandert auf der Diagonale $AC$. Die abgenommene Leistung wird ein Maximum, wenn $H$ die Strecke $AC$ halbiert. Der Wirkungsgrad $\eta$ wird um so besser, je mehr sich $H$ dem Punkte $C$ nähert.

Will man in dieser rein theoretischen Betrachtung die Verluste in der Erregung, in den Lagern, im Ankereisen u. s. w. näherungsweise berücksichtigen, so kann man dafür einen konstanten Stromverlust $i_r = J_E + J_R + J_H$ einsetzen und schreiben

$$\eta = \frac{E}{E_k} \, \frac{\frac{E_k - E}{w} - i_r}{\frac{E_k - E}{w}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (7)$$

$\eta$ wird ein Maximum bei

$$(E_k - E)^2 = E_k w i_r.$$

Zur Ermittelung des nützlichen Drehmomentes bei irgend einer von aussen zugeführten Stromstärke $J$ verfährt man zweckmässig folgendermassen. Man ermittelt bei der entsprechenden Erregung und gegenelektromotorischen Kraft $E$, sowie bei der gleichen Umlaufszahl wie bei der in Frage stehenden Belastung den Leerlaufstrom $i_r$ bezw. interpoliert ihn aus einer Reihe Aufnahmen und schreibt dann

$$M = \frac{p}{2\pi \cdot 9{,}81} (J - i_r) \, Z K \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \quad (8)$$

Der Wert von $K$ muss aus der Leerlaufcharakteristik unter Berücksichtigung des OHMschen Abfalls, der Ankerrückwirkung und Bürstenverstellung gewonnen werden.

Nicht selten wird auch geschrieben

$$M = \frac{p}{61{,}6\,a} J Z K \eta \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

wenn $\eta$ der Wirkungsgrad des Motors und $J$ der äussere Strom ist.

§ 8. Totaler Wirkungsgrad. Verluste.

Will man den gesamten Wirkungsgrad eines Gleichstrommotors aus seinen einzelnen Posten berechnen, so schreibe man, wenn $A_r$ die sämtlichen Verluste sind

$$\eta = \frac{A_m}{A_m + A_r} = \frac{A_m}{A_m + J_a^2 w + A_H + A_W + J_e^2 w_e + A_B + A_{BL} + A_{RB} + A_{RV}} \quad (10)$$

$J_a^2 w$ geht im Ankerkupfer verloren, dieser Verlust steigt rasch mit der Belastung, $A_H$ ist der Verlust durch Hysteresis im Eisen[1]) des Ankers und even-

1) Es ist noch eine ungeklärte Frage, ob man Hysteresis- und Wirbelstromverluste bei Generatoren und Motoren wie OHMsche Verluste oder als Nebenströme (wie den Erregerstrom) oder als Gegen-AW in die Berechnung einführen soll. Sie wie OHMsche Verluste (also wie Spannungen) zu behandeln, erscheint dem Verfasser bei hohen Sättigungen sehr gewagt. Die Kupferverluste sowie die Eisenverluste im Anker sind prozentuell die grösseren Verluste, Erregung und Reibungsverluste zeigen gewöhnlich geringere Prozentsätze

tuell in den Polen, $A_w$ sind die Wirbelstromverluste in den Ankerblechen, Ankerleitern, Bolzen, Polen[1]) u. s. w., $J_e^2 w_e$ ist der Verlust in der Erregung, zu dem je nachdem noch die in Vorschaltwiderständen vernichteten Effektbeträge zu schlagen sind. $A_B$ ist der Verlust, der durch den Übergangs-

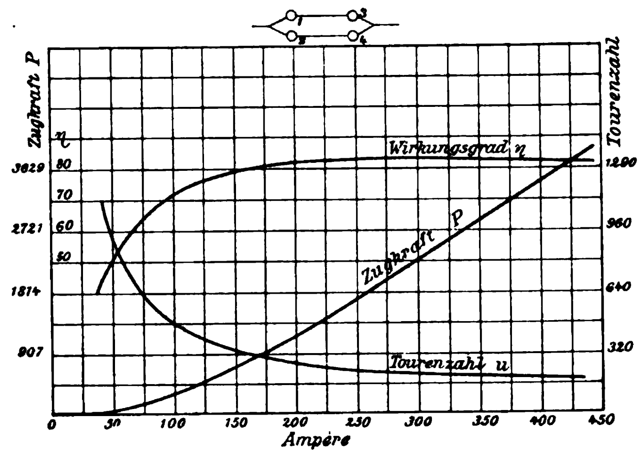



Fig. 5.

widerstand am Kollektor bedingt ist, derselbe mag eventuell Wirbelstromverluste in den Lamellen, die Verluste in den Klemmen und durch Funken einschliessen. Die Beträge $A_{RL} + A_{RB} + A_{RV}$ gehen durch Lagerreibung,

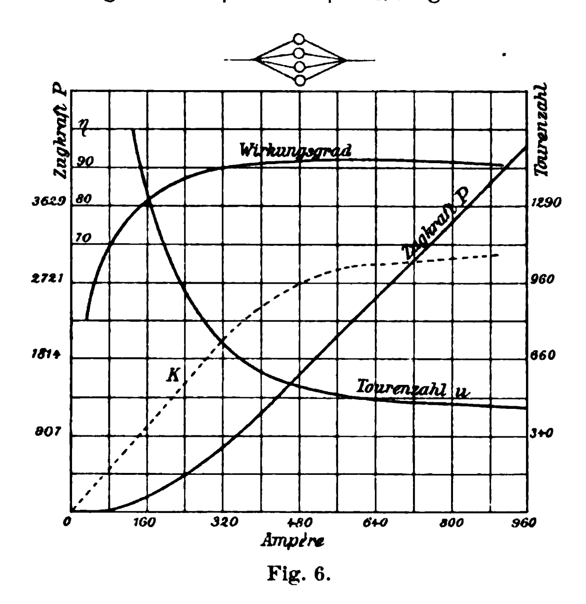
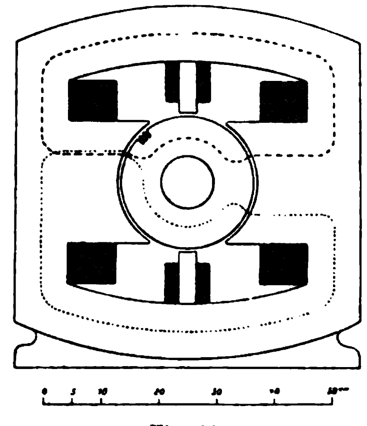



Fig. 6.

Bürstenreibung und Ventilation (Luftreibung) verloren. Bezüglich der Berechnung dieser Beträge muss auf Band III und namentlich auf Band IV

1) Über Verluste in den Polschuhen siehe auch DETTMAR, E. T. Z. 1900, p. 946, wo auch angegeben wird, dass die Vergrösserung der Ankereisenverluste gegenüber Transformatoreisen teilweise darin zu suchen ist, dass die Zahninduktion nur allmählich in die kleinere Ankerinduktion übergeht.

werden als bei Leerlauf. In Fig. 11 ist nach PICOU eine unverzerrte (— — —) und eine verzerrte (· · ·) mittlere Kraftlinie eingezeichnet.[1]) Die Skizze zeigt zugleich Hilfspole zur Neutralisierung der Anker-$AW$. In dem Motor (Fig. 12) sind die Pole derart ausgebildet, dass eine nennenswerte Verzerrung der Kraftlinien unmöglich ist. Was PICOU nicht angegeben hat, ist das, dass die resultierenden Ampèrewindungen bei Belastung nicht allein wegen der verlängerten Kraftlinienwege anders werden als bei Leerlauf, sondern dass auch die Anker-$AW$, durch welche eine mittlere Kraftlinie verläuft, in ihrer



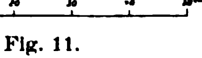


Fig. 11.

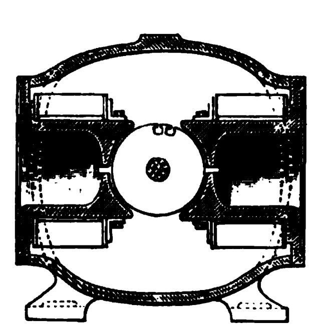


Fig. 12.

Summe nicht Null sind, sondern in der Regel einen positiven Betrag haben, also wie die Feld-$AW$ treibend wirken.

§ 10. Funkenbildung.

Zur Beurteilung der Güte eines Motors bezüglich **Funkenbildung** führe ich folgende Formeln an, die auf theoretischen Grundlagen[2]) entwickelt experimentell bestätigt sind.

1) Die Ankerampèrewindungszahl darf gegenüber der Feld-$AW$-Zahl eine gewisse Grösse nicht überschreiten, was durch die Beziehung

$$\frac{1{,}6\, B_l\, \delta}{b \cdot AS} > C_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

zum Ausdruck gebracht wird. Dabei ist $B_l$ die mittlere Luftinduktion (bei Nutenankern ist als Luftquerschnitt das Mittel aus Polrand und Summe der Zahnkronen pro Pol zu nehmen), $\delta$ ist der Luftzwischenraum in cm, $b$ der Polbogen in cm, $AS$ die Zahl der Ampèredrähte pro cm Ankerumfang,

$$AS = \frac{J_a \cdot Z}{2a \cdot \pi D}.$$

1) Siehe F. NIETHAMMER, E. T. Z. 1900. POTIER sucht PICOU'S Anschauung zu widerlegen. Nach POTIERS Erfahrung ist die übliche Theorie der Gegenwindungen innerhalb des doppelten Bürstenvorschubwinkels sowie der Querwindungen für glatte Anker immer zutreffend. Bei Nutenankern bedinge die hohe Sättigung und damit niedrige und variable Permeabilität der Zähne eine Ausnahme.

2) Siehe ARNOLD Ankerwicklungen; F. NIETHAMMER, E. T. Z. 1900; ARNOLD vernachlässigt allerdings die gegenseitige Induktion der kurzgeschlossenen Spulen aufeinander.

$C_1$ ist bei guten Maschinen 1—2,5. $AS$ schwankt zwischen etwa 50 (kleine Maschinen) und 300 (grosse Maschinen), der Wert ist annähernd proportional $\sqrt{D}$. Die Gleichung (11) erfüllt auch die Forderung, dass das Feldminimum an den Polkanten eine gewisse Grösse nicht unterschreitet. Für die Feldverzerrung ist das Verhältnis $AW$ auf dem Felde für Luftspalt und Anker: $AW$ auf dem Anker unter einem Pole massgebend.

2) Es soll sein der Ausdruck

$$\frac{W_u T}{L} < C_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (12)$$

$W'_u$ soll den Übergangswiderstand der Bürsten pro Zapfen (bei Parallelschaltung mit nur zwei Bürstenzapfen, also mit Kollektorverbindungen setze $W'_u = p\,W_u$; bei Reihenparallelschaltung mit $2a$ Zweigen und $2p$ Bürstenzapfen $W'_u = a\,W_u$ zu setzen), $T$ die Kommutierungszeit, $L$ den Selbstinduktionskoeffizienten bezw. eine ihm proportionale Grösse bedeuten, nämlich[1])

$$L = p \cdot 10^{-8} \frac{Z^2}{k^2} \left[ \frac{2\,l}{\pi} \log_{nat} \left(1 + \pi \frac{b_z}{b_n}\right) + \frac{z\,l}{b_n} \right] \quad . \; . \; . \quad (13)$$

und

$$T = \frac{d_b \cdot 60}{D_k \cdot \pi \,.\, u} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (14)$$

$p$ ist bei Reihen- und Reihenparallelschaltung gleich der Polpaarzahl, bei zweipoligen Maschinen und solchen mit Parallelschaltung ist $p = 1$, $k$ ist die Lamellenzahl, $l$ die Ankerlänge, $b_z$ die Zahnbreite aussen, $b_n$ die Nutenbreite,

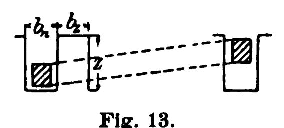



Fig. 13.

$z$ die Nutentiefe (Fig. 13), $d_b$ die Bürstenstärke in Richtung des Umfangs, $D_k$ der Kollektordurchmesser. $C_2$ findet sich für Metallbürsten zu 0,02—0,2, bei Kohlenbürsten zu 0,6—2.

3) Das selbstinduzierte Feld $L'i$ soll sein[2])

$$L'i < C_3 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (15)$$

1) Der Ausdruck für $L$ gilt nur für offene Nuten, ist die Nute durch einen Schlitz von der mittleren Breite $x$ und der Tiefe $y$ teilweise geschlossen, so ist obiger Klammer ein Ausdruck $\frac{2y}{x}\,l$ zuzufügen. (Selbstinduktion der Stirnverbindungen vernachlässigt!)

2) Arnold giebt E. T. Z. 1899 an, dass $\frac{L'i}{l}$ eine gewisse Grösse nicht überschreiten soll, $l$ rührt daher, dass die Theorie einen Ausdruck $\frac{L'i}{(e - iw)\,T}$ ergiebt, worin $e$ die kommutierende elektromotorische Kraft ist, die ebenso wie $iw$ der Ankerlänge $l$ proportional gesetzt wird, was aber nicht gerechtfertigt scheint, da $e$ bei jeder Maschinenlänge durch eine geringe Bürstenverschiebung beliebig geändert werden kann. Die Beziehung (15) lässt sich auch so fassen:

$$2\pi n L'i < e,$$

d. h. die EMK der Selbstinduktion soll einen Grenzwert nicht übersteigen; dabei ist $n$ die Frequenz der Kommutierung

wenn $i = \frac{J_a}{2a}$ der Strom pro Zweig, der womöglich kleiner als 200 Ampère sein soll, und $L' = \frac{L}{p}$ ist. $C_3$ ist 4 bis $15 \cdot 10^{-4}$.

Die letzte Beziehung lässt sich durch vereinfachende Zusammenziehung auch schreiben

$$k > C_4 Z \sqrt{i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

ein Ausdruck für die zu wählende Lamellenzahl. $C_4$ soll $\geq$ 0,03—0,04 sein.

In den obigen Formeln ist der Verlauf des Feldes am Ankerumfang und dessen allmähliches Abflachen in der Kommutierungszone, das sehr von Einfluss auf die Funkenbildung ist, nicht berücksichtigt. Der Wickelschritt in seinem Verhältnis zur Polteilung und zum Polbogen und besonders die Güte der Ausführung von Bürsten und Kollektor sowie die Stromdichte in ersteren sind für die Kommutierung von grösster Bedeutung. Die Umfangsgeschwindigkeit $v$ des Kollektors ist ebenfalls wichtig, $v <$ 10—14 m/sec.

Nur ganz kleine Motoren ($< {}^1/_2$ PS) erhalten gelegentlich nur 2—4 Lamellen (eventuell mit I-Anker), aber der Strom zeigt dann entsprechend der variablen Gegen-EMK erhebliche Schwankungen und das Anzugsmoment ist in verschiedenen Stellungen sehr verschieden, unter Umständen sogar Null.

## e) Volumen, Gewicht, Tourenzahl.

§ 11. Dimensionsformeln.

Für den Entwurf von Gleichstrommotoren giebt die Beziehung

$$A_p = C \cdot d^2 l u \cdot 10^{-6} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

einen gewissen Anhalt, wenn $A_p$ die Leistung in PS ist. $C$ ist für 5 PS etwa 0,6—1,0 und steigt bei grossen Motoren bis auf 2,7—3,0. Eine

---

$$n = \frac{1}{2T} = \frac{D_k \pi u}{60 \cdot 2 \cdot d_b}.$$

PARSHALL & HOBART verwenden diese letzte Methode in ihrem Werke „Electric Generators". Sie setzen die „reactance voltage" in Volt

$$e = 2\pi \cdot 20 l \cdot 10^{-8} \cdot z_e \cdot z \cdot n i \cdot x.$$

Dabei ist $l$ die effektive Ankerlänge in Zoll; die Zahl 20 rührt daher, dass im Mittel unabhängig von der Nutenform (!) eine Ampèrewindung 20 C. G. S.-Kraftlinien erzeugen soll; $z_e$ ist die Zahl der gleichzeitig pro Bürstenstift kommutierten Leiter, $z$ bedeutet die Windungszahl pro Ankerspule, $i$ den Ankerstrom auf den Leiter bezogen, $x$ ist bei Parallelschaltung des Ankers und $2p$ Bürstenzapfen $= 1$, bei Serienschaltung mit nur zwei Bürstenzapfen soll $x = p$ sein. Die in obigem Werke angezogenen Beispiele zeigen Werte von $e$ zwischen 3 und 10. Die Formel schenkt nach des Verfassers Erachten dem Einfluss der Nutenform zu wenig Beachtung (es wird wohl gesagt, dass statt 20 auch andere Werte benutzt werden können), überdies scheint die Einführung der gegenseitigen Induktion durch $z_e$ in dieser Art und Weise sehr gewagt. $z$ ist in dem Ausdruck indirekt in der zweiten Potenz enthalten wie in (13). Bei Benutzung des Wertes $2\pi n L' i = e$, ist jedenfalls auch das Verhältnis

$$\frac{e}{iw} = \frac{\text{Selbstinduktionsabfall}}{\text{Ohmscher Abfall}}$$

in der Spule von Wichtigkeit.

Formel mit annähernd konstantem Koeffizienten erhält man, wenn man setzt

$$A_p = C' \cdot (d^2 l)^x \cdot u \cdot 10^{-7} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

($x = 1{,}2$ bis $1{,}4$). Der für alle Motorgrössen geltende Wert $C'$ ist je nach der Geschicklichkeit des Entwerfenden und je nach der Reichlichkeit des Modells grösser oder kleiner. $\frac{A_p}{u}$ wird hin und wieder Massenfaktor genannt.[1])

Bei Neuentwürfen kann man sich für $\frac{l}{d}$ an die Regel halten

$$\frac{l}{d} = \frac{\pi}{2p} \text{ bis } \frac{\pi}{4p},$$

solange die Umfangsgeschwindigkeit $v$ nicht zu gross wird oder andere Gründe dagegen sprechen.

Umfangsgeschwindigkeit $v \leq 18$ m bei kleineren Maschinen, $v \leq 22$ bei grösseren Typen, bei nahezu geschlossenen Nuten bis 30 m.

Das Gewicht[2]) eines Motors kann näherungsweise berechnet werden aus

$$G^{kg} = 14\,500 \left(\frac{A_p}{u}\right)^{2/3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Davon entfallen 10—30 % auf den Anker.

§ 12. Tourenzahl.

JACKSON findet, dass für kleine Maschinen ungefähr gilt

$$PS = \frac{G^{1,16}}{150},$$

für grössere

$$PS = \frac{G}{60} + 6.$$

Vergleicht man einen Motor mit geringer Tourenzahl bei gleicher Leistung mit einem solchen von hoher Tourenzahl, so findet man, dass ersterer grösser und teuerer ist. Sein Wirkungsgrad und sein Tourenabfall bei Belastung, der proportional dem Kupferverlust im Anker und proportional der Ankerrückwirkung steigt, werden ungünstiger. Der langsamlaufende Motor braucht aber zur Übersetzung wenig oder gar keine Zwischenvorgelege und seine Anlaufsverluste können erheblich geringer sein als bei hohen Touren, so dass der Gesamtwirkungsgrad wieder recht günstig werden kann. Zu Funkenbildung sind langsamlaufende Motoren, trotzdem der Wert von $L$ (Gleichung 13) häufig grösser ist als bei hohen Touren, in der Regel weniger geneigt als sehr raschlaufende. Um sich ein Bild über die Ersparnis

---

1) Ist $d_a$ der äussere Feldgestelldurchmesser und $d_i$ der innere Durchmesser des aktiven Eisens, so kann man auch schreiben

$$A_p = C'' \, (d_a^2 - d_i^2) \, l \, u.$$

Allerdings das sicherste Mass beim Entwurf von Motoren ist das, sie darauf zu prüfen, wieviel kg aktives Ankereisen pro PS, wieviel kg Anker- und Erregerkupfer pro PS, wieviel Feldeisen pro PS und wieviel Totalgewicht pro PS sie brauchen und dabei Minimalwerte anzustreben.

2) FISCHER-HINNEN.

wenn $i = \frac{J_a}{2a}$ der Strom pro Zweig, der womöglich kleiner als 200 Ampère sein soll, und $L' = \frac{L}{p}$ ist. $C_3$ ist 4 bis $15 \cdot 10^{-4}$.

Die letzte Beziehung lässt sich durch vereinfachende Zusammenziehung auch schreiben

$$k > C_4 Z \sqrt{i} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (16)$$

ein Ausdruck für die zu wählende Lamellenzahl. $C_4$ soll $>$ 0,03—0,04 sein.

In den obigen Formeln ist der Verlauf des Feldes am Ankerumfang und dessen allmähliches Abflachen in der Kommutierungszone, das sehr von Einfluss auf die Funkenbildung ist, nicht berücksichtigt. Der Wickelschritt in seinem Verhältnis zur Polteilung und zum Polbogen und besonders die Güte der Ausführung von Bürsten und Kollektor sowie die Stromdichte in ersteren sind für die Kommutierung von grösster Bedeutung. Die Umfangsgeschwindigkeit $v$ des Kollektors ist ebenfalls wichtig, $v \leq$ 10—14 m/sec.

Nur ganz kleine Motoren ($< 1/_2$ PS) erhalten gelegentlich nur 2—4 Lamellen (eventuell mit I-Anker), aber der Strom zeigt dann entsprechend der variablen Gegen-EMK erhebliche Schwankungen und das Anzugsmoment ist in verschiedenen Stellungen sehr verschieden, unter Umständen sogar Null.

## e) Volumen, Gewicht, Tourenzahl.

§ 11. Dimensionsformeln.

Für den Entwurf von Gleichstrommotoren giebt die Beziehung

$$A_p = C \cdot d^2 l u \cdot 10^{-6} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (17)$$

einen gewissen Anhalt, wenn $A_p$ die Leistung in PS ist. $C$ ist für 5 PS etwa 0,6—1,0 und steigt bei grossen Motoren bis auf 2,7—3,0. Eine

---

$$n = \frac{1}{2T} = \frac{D_k \pi u}{60 \cdot 2 \cdot d_b}.$$

PARSHALL & HOBART verwenden diese letzte Methode in ihrem Werke „Electric Generators". Sie setzen die „reactance voltage" in Volt

$$e = 2\pi \cdot 20 l \cdot 10^{-8} \cdot z_e \cdot z \cdot ni \cdot x.$$

Dabei ist $l$ die effektive Ankerlänge in Zoll; die Zahl 20 rührt daher, dass im Mittel unabhängig von der Nutenform (!) eine Ampèrewindung 20 C. G. S.-Kraftlinien erzeugen soll; $z_e$ ist die Zahl der gleichzeitig pro Bürstenstift kommutierten Leiter, $z$ bedeutet die Windungszahl pro Ankerspule, $i$ den Ankerstrom auf den Leiter bezogen, $x$ ist bei Parallelschaltung des Ankers und $2p$ Bürstenzapfen = 1, bei Serienschaltung mit nur zwei Bürstenzapfen soll $x = p$ sein. Die in obigem Werke angezogenen Beispiele zeigen Werte von $e$ zwischen 3 und 10. Die Formel schenkt nach des Verfassers Erachten dem Einfluss der Nutenform zu wenig Beachtung (es wird wohl gesagt, dass statt 20 auch andere Werte benutzt werden können), überdies scheint die Einführung der gegenseitigen Induktion durch $z_e$ in dieser Art und Weise sehr gewagt. $z$ ist in dem Ausdruck indirekt in der zweiten Potenz enthalten wie in (13). Bei Benutzung des Wertes $2\pi n L' i = e$, ist jedenfalls auch das Verhältnis

$$\frac{e}{iw} = \frac{\text{Selbstinduktionsabfall}}{\text{OHMscher Abfall}}$$

in der Spule von Wichtigkeit.

§ 15. Serienmotor.

(21)

lemmen-

entspricht
auftretenden

∼ Moment $M$)
keit von $M$ ist
ender Klemmen-
Stromstärke und

der Belastung $M$ nimmt
r Serienmotor durch.
omstärke $J_a$, es ist bei
bei hohen Werten von $J_a$
Das Anzugsmoment eines

an Anlaufsenergie bei langsamlaufenden Typen zu machen, hat man die Beschleunigungsarbeit

$$\frac{m v^2}{2} = \frac{m \omega^2 r^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{\pi u}{30}\right)^2 r^2$$

des rotierenden Ankers zu bilden, wenn

$$m = \frac{G}{g}$$

die Ankermasse und $v$ die Geschwindigkeit am Ende des Trägheitshalbmessers $r$ ist. Untersuchungen an ausgeführten Motoren ergeben, dass bei der $^1/_2$ Tourenzahl (zwei Modelle für $u$ und $\frac{u}{2}$ Touren verglichen) die Anlaufsenergie nur noch 50—70% der ursprünglichen ist.[1])

## f) Weitere charakteristische Konstanten.

§ 13. Induktionen. Die Induktionen im Ankereisen schwanken je nach Motorgrösse, Ventilation und Periodenzahl etwa zwischen 7000 und 16000. Die Induktionen $B_1$ und $B_2$ bei den Periodenzahlen $n_1$ und $n_2$ sollen sich ungefähr verhalten:

$$\frac{B_1}{B_2} = \sqrt[1,8]{\frac{n_2}{n_1}}.$$

Die Induktion in den Ankerzähnen beträgt 12000 bis 24000 je nach der Tiefe der Zähne, der Periodenzahl und Ventilation. Am Polrand finden sich Induktionen von 4000 bis 11000 je nach Maschinengrösse. Im Pol (Magnetkern) ist bei Stahlguss $B = 12000$ bis 17000 (Streuung eingeschlossen), bei Gusseisen 6000 bis 8000, im Joch etwas weniger. Der Streukoeffizient ist meist kleiner als 1,2. Er wächst mit abnehmendem Verhältnis $D/2p$. Die Nutentiefe sollte bei sehr grossen Motoren $< 50$ mm, bei Motoren unter 100 PS $< 35$ mm sein.

§ 14. Stromdichte. Die Stromdichte im Anker ist bei ganz kleinen Motoren 4—6 Amp./qmm und fällt bei grossen bis auf 2 herunter. Im Feld beträgt die Stromdichte entsprechend 2,5 bis 0,6 Amp.; Wickeltiefe der Feldspulen $< 60$ bis 80 mm.

Polbogen-Polteilung wird bei entsprechender Gestaltung der Polschuhe (allmähliches Abflachen des Feldes) meist = 0,75 bis 0,85 gewählt. Bei schwachem Feld sind kleinere Polbögen ratsam.

Die Stromdichte an der Bürstenkontaktfläche beträgt bei Kohlenbürsten 2 bis 8 Amp./qmm je nach Güte der Kohle; bei niedriger Klemmenspannung können höhere Werte genommen werden. Von grossen Motoren abgesehen, variieren die Anker-AW pro Pol zwischen 1500 und 4000, wenn die totalen Feld-AW pro Pol 3500 bis 10000 betragen.

---

1) Siehe F. NIETHAMMER, Elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen.

## g) Die verschiedenen Arten von Gleichstrommotoren.

Ein Gleichstrommotor kann entweder so erregt werden, dass der Hauptstrom die Erregerwicklung und den Anker hintereinander durchfliesst: Serienmotor, Hauptstrommotor, oder aber es wird direkt vom Netz ein Teil des Stromes zur Erregung abgezweigt: Nebenschlussmotor. Eine Kombination beider heisst Compoundmotor oder Motor mit gemischter Wicklung. Motoren, die von einer fremden Stromquelle erregt werden, sind in der Praxis selten verwendet; ebenso ist die Erregung durch permanente Magnete veraltet.

### α) Serienmotor.

§ 15. Serienmotor.

Die beiden charakteristischen Gleichungen für den Serienmotor lauten, wenn

$$K = f(J_a) = \frac{J_a}{\alpha + \beta J_a}$$

(letzteres in Annäherung nach Frölich) gesetzt wird,

$$u = (E_k - J_a w) \frac{60 \cdot 10^8}{Z f(J_a)} \frac{a}{p} = (E_k - J_a w) \frac{60 \cdot 10^8}{Z J_a} (\alpha + \beta J) \frac{a}{p}$$

oder

$$u = (E_k - J_a w) \frac{60 \cdot 10^8}{Z} \left(\frac{\alpha}{J_a} + \beta\right) \frac{a}{p} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (20)$$

und

$$M = \frac{p}{2\pi \cdot 9{,}81 a} (J_a - J_R - J_H) f(J_a) \cdot Z \cdot 10^{-8}$$

oder angenähert

$$M = \frac{p}{61{,}6 a} \frac{J_a^2}{\alpha + \beta J_a} Z \cdot 10^{-8} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (21)$$

Dabei ist $E_k$ die Spannung an den Ankerklemmen, während die Klemmenspannung wird

$$E_k' = E_k + J w_s,$$

wenn $w_s$ der Widerstand der Serienwicklung ist. Der Wert $f(J_a)$ entspricht der thatsächlich, also auch mit Rücksicht auf Ankerrückwirkung auftretenden Kraftlinienzahl.

In Fig. 6 ist in Abhängigkeit des Stromes $J_a$ die Zugkraft $P$ ($\sim$ Moment $M$) und die Kraftlinienzahl $K = f(J_a)$ dargestellt. In Abhängigkeit von $M$ ist in Fig. 14 (Kurve $R$) die Tourenzahl $u$ und zwar bei gleichbleibender Klemmenspannung $E_k'$ und in Figur 15 (Kurve $R$) bei konstanter Stromstärke und variabler Spannung aufgezeichnet.

Charakteristisch für den Serienmotor ist:

1) Mit zunehmender Stromstärke $J_a$ bezw. steigender Belastung $M$ nimmt die Tourenzahl ab, bei der Belastung $M = 0$ geht der Serienmotor durch.

2) Das Moment $M$ wächst rascher als die Stromstärke $J_a$, es ist bei kleinen Stromstärken annähernd proportional $J_a^2$, bei hohen Werten von $J_a$ wächst es allerdings nur noch direkt mit $J_a$. Das Anzugsmoment eines

werden als bei Leerlauf. In Fig. 11 ist nach PICOU eine unverzerrte (— — —) und eine verzerrte (· · ·) mittlere Kraftlinie eingezeichnet.[1]) Die Skizze zeigt zugleich Hilfspole zur Neutralisierung der Anker-*AW*. In dem Motor (Fig. 12) sind die Pole derart ausgebildet, dass eine nennenswerte Verzerrung der Kraftlinien unmöglich ist. Was PICOU nicht angegeben hat, ist das, dass die resultierenden Ampèrewindungen bei Belastung nicht allein wegen der verlängerten Kraftlinienwege anders werden als bei Leerlauf, sondern dass auch die Anker-*AW*, durch welche eine mittlere Kraftlinie verläuft, in ihrer

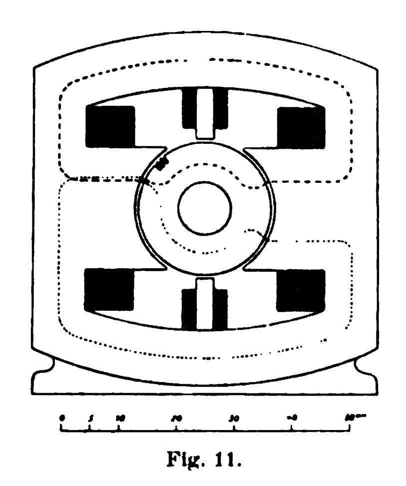


Fig. 11.

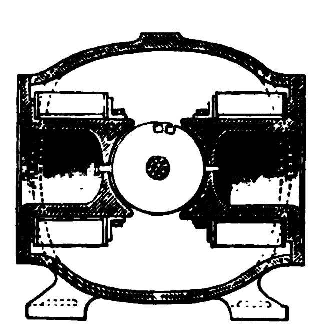


Fig. 12.

Summe nicht Null sind, sondern in der Regel einen positiven Betrag haben, also wie die Feld-*AW* treibend wirken.

§ 10. Funkenbildung. Zur Beurteilung der Güte eines Motors bezüglich **Funkenbildung** führe ich folgende Formeln an, die auf theoretischen Grundlagen[2]) entwickelt experimentell bestätigt sind.

1) Die Ankerampèrewindungszahl darf gegenüber der Feld-*AW*-Zahl eine gewisse Grösse nicht überschreiten, was durch die Beziehung

$$\frac{1{,}6\, B_l\, \delta}{b \cdot AS} > C_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

zum Ausdruck gebracht wird. Dabei ist $B_l$ die mittlere Luftinduktion (bei Nutenankern ist als Luftquerschnitt das Mittel aus Polrand und Summe der Zahnkronen pro Pol zu nehmen), $\delta$ ist der Luftzwischenraum in cm, $b$ der Polbogen in cm, $AS$ die Zahl der Ampèredrähte pro cm Ankerumfang,

$$AS = \frac{J_a \cdot Z}{2a \cdot \pi D}.$$

1) Siehe F. NIETHAMMER, E. T. Z. 1900. POTIER sucht PICOU's Anschauung zu widerlegen. Nach POTIERS Erfahrung ist die übliche Theorie der Gegenwindungen innerhalb des doppelten Bürstenvorschubwinkels sowie der Querwindungen für glatte Anker immer zutreffend. Bei Nutenankern bedinge die hohe Sättigung und damit niedrige und variable Permeabilität der Zähne eine Ausnahme.

2) Siehe ARNOLD Ankerwicklungen; F. NIETHAMMER, E. T. Z. 1900; ARNOLD vernachlässigt allerdings die gegenseitige Induktion der kurzgeschlossenen Spulen aufeinander.

$C_1$ ist bei guten Maschinen 1—2,5. $AS$ schwankt zwischen etwa 50 (kleine Maschinen) und 300 (grosse Maschinen), der Wert ist annähernd proportional $\sqrt{D}$. Die Gleichung (11) erfüllt auch die Forderung, dass das Feldminimum an den Polkanten eine gewisse Grösse nicht unterschreitet. Für die Feldverzerrung ist das Verhältnis $AW$ auf dem Felde für Luftspalt und Anker: $AW$ auf dem Anker unter einem Pole massgebend.

2) Es soll sein der Ausdruck

$$\frac{W_u T}{L} < C_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

$W'_u$ soll den Übergangswiderstand der Bürsten pro Zapfen (bei Parallelschaltung mit nur zwei Bürstenzapfen, also mit Kollektorverbindungen setze $W'_u = p\,W_u$; bei Reihenparallelschaltung mit $2a$ Zweigen und $2p$ Bürstenzapfen $W_u = a\,W_u$ zu setzen), $T$ die Kommutierungszeit, $L$ den Selbstinduktionskoeffizienten bezw. eine ihm proportionale Grösse bedeuten, nämlich[1])

$$L = p \cdot 10^{-8} \frac{Z^2}{k^2} \left[\frac{2l}{\pi} \log_{nat} \left(1 + \pi \frac{b_z}{b_n}\right) + \frac{zl}{b_n}\right] \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

und

$$T = \frac{d_b \cdot 60}{D_k \cdot \pi \cdot u} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

$p$ ist bei Reihen- und Reihenparallelschaltung gleich der Polpaarzahl, bei zweipoligen Maschinen und solchen mit Parallelschaltung ist $p = 1$, $k$ ist die Lamellenzahl, $l$ die Ankerlänge, $b_z$ die Zahnbreite aussen, $b_n$ die Nutenbreite,

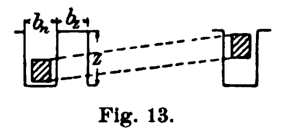


Fig. 13.

$z$ die Nutentiefe (Fig. 13), $d_b$ die Bürstenstärke in Richtung des Umfangs, $D_k$ der Kollektordurchmesser. $C_2$ findet sich für Metallbürsten zu 0,02—0,2, bei Kohlenbürsten zu 0,6—2.

3) Das selbstinduzierte Feld $L'i$ soll sein[2])

$$L'i < C_3 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

1) Der Ausdruck für $L$ gilt nur für offene Nuten, ist die Nute durch einen Schlitz von der mittleren Breite $x$ und der Tiefe $y$ teilweise geschlossen, so ist obiger Klammer ein Ausdruck $\frac{2y}{x}\,l$ zuzufügen. (Selbstinduktion der Stirnverbindungen vernachlässigt!)

2) Arnold giebt E. T. Z. 1899 an, dass $\frac{L'i}{l}$ eine gewisse Grösse nicht überschreiten soll, $l$ rührt daher, dass die Theorie einen Ausdruck $\frac{L'i}{(e - iw)\,T}$ ergiebt, worin $e$ die kommutierende elektromotorische Kraft ist, die ebenso wie $iw$ der Ankerlänge $l$ proportional gesetzt wird, was aber nicht gerechtfertigt scheint, da $e$ bei jeder Maschinenlänge durch eine geringe Bürstenverschiebung beliebig geändert werden kann. Die Beziehung (15) lässt sich auch so fassen:

$$2\pi n L'i < e,$$

d. h. die EMK der Selbstinduktion soll einen Grenzwert nicht übersteigen; dabei ist $n$ die Frequenz der Kommutierung

Serienmotors ist grösser als beim Nebenschlussmotor, für das $1^1/_2$fache des normalen Stromes ist das Anzugsmoment schon annähernd doppelt so gross wie das normale.

3) Die Funkenbildung des Serienmotors ist geringer als beim Nebenschlussmotor, da Ankerstrom und Feldstärke miteinander ansteigen. Die An- und Auslaufszeit und -energie sind beim Serienmotor geringer als bei Nebenschlusserregung.

In Fig. 16 und 17 sind einige Betriebskurven[1]) von Serienmotoren gezeichnet. In Fig. 16[2]) ist die Klemmenspannung $E_k$ (Ordinaten) und die Stromstärke $J$ (Abscissen) variabel, dagegen die Tourenzahl konstant angenommen und dann eine Kurvenschar für die Pferdestärken bestimmt, die es ermöglicht jede Pferdestärkenzahl mit einem beliebigen Produkt $E_k \times J$ zu erreichen, z. B. 3 PS mit 100 Volt $\times$ 22 Amp. oder 73 Volt $\times$ 30 Amp.

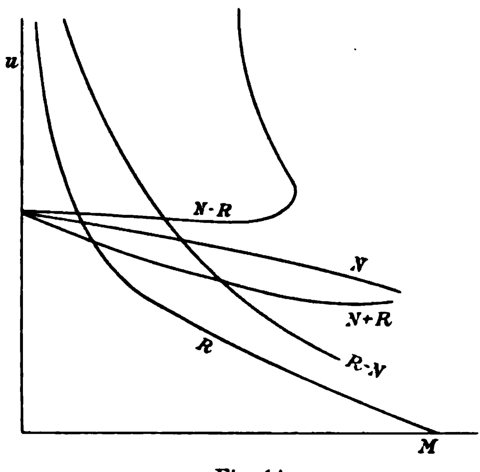


Fig. 14.

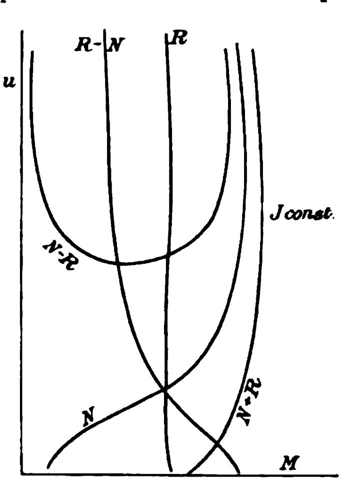


Fig. 15.

oder 56 Volt $\times$ 40 Amp. u. s. w. In Fig. 17[3]) ist aus der Kurve der Kraftlinien $K = f(J)$ mit Hilfe der etwas abfallenden Geraden

$$Ku = (E_k - Jw)\,\frac{60 \cdot 10^8}{Z}\,\frac{a}{p}$$

für konstantes $E_k$ die Kurve der Tourenzahl $u$ in Abhängigkeit von $J$ bestimmt. Die $K$-Kurve ist durch Fremderregung, z. B. bei $u_1$-Touren aufgenommen. Bei irgend einem Strome $J_x$ ergiebt sich nun aus dem Wert von $(Ku)$ und dem von $u_1$ durch Division ein Wert

$$K_1' = \frac{(Ku)_x}{u_1}.$$

Der Motor hat dann bei diesem Strome $J_x$ eine Tourenzahl

$$u_x = \frac{K_x}{u_1 K_1'}.$$

($K_x$ ist aus der $K$-Kurve entnommen.)

1) Betriebskurven, weil sie das Verhalten im Betrieb charakterisieren.
2) Siehe Kapp, Elektrische Kraftübertragung.
3) Rössler, Die Gleichstrommotoren.

Für 100 Ampère bestimmt man nun z. B. die Tourenzahl folgendermassen. Der OHMsche Abfall $Jw$ sei 60 Volt, $E_k = 100$ Volt, es bleiben also $E_k - Jw = E = c \cdot (Ku) = 40$ Volt gegenelektromotorische Kraft; bei 100 Ampère und $c K_1 u_1 = E_1 = 68$ Volt gegenelektromotorische Kraft (Kurve $K$, die proportional $E$ ist) würde der Motor $u_1 = 500$ Touren machen, also macht er thatsächlich $500 \frac{40}{68} = 294$ Touren.

Ein Fall, wo der Serienmotor zweckmässig verwendet wird, ist die Übertragung von einem Generator auf einen Motor (Fig. 18[1]). Beide Maschinen tragen Serienwicklung. Die Charakteristiken beider Maschinen werden ungefähr so ausgeglichen, dass die Motorcharakteristik $M$ (Fig. 19) auf ihrem ganzen Verlauf um einen ansteigenden Betrag $Jw$ tiefer liegt als die Dynamocharakte-

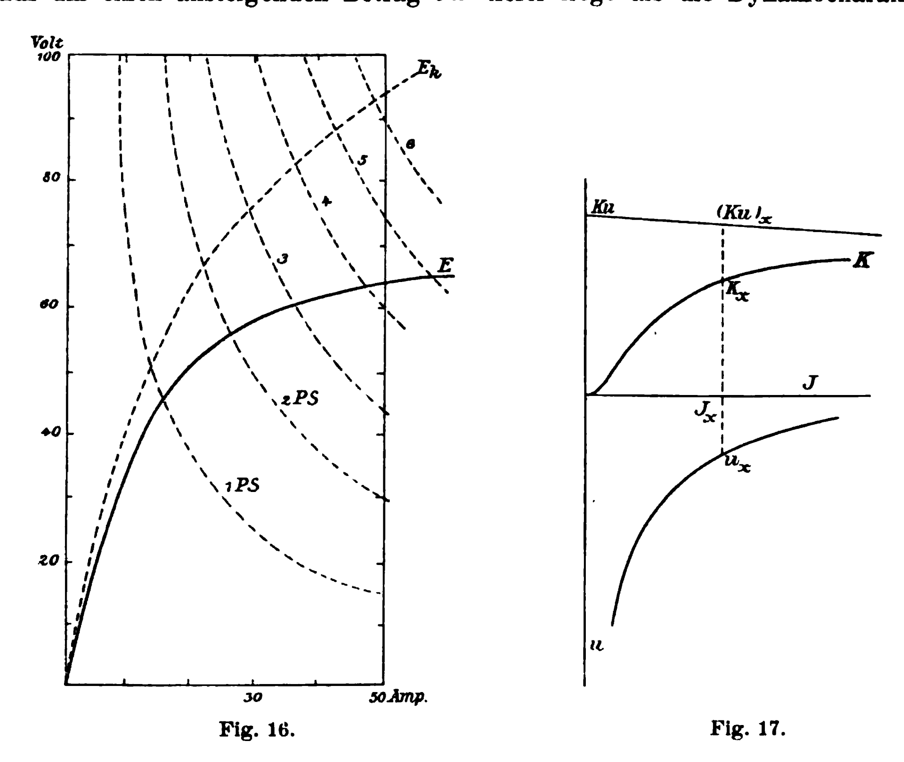



Fig. 16. Fig. 17.

ristik $D$. $Jw$ ist der gesamte Abfall durch den Widerstand der Leitung, des Generators und des Motors. In diesem Falle läuft der Motor mit konstanter Tourenzahl bei jeder Belastung, vorausgesetzt, dass der Generator mit konstanter Umlaufszahl betrieben wird. Die Bedingung, dass $E_1 - E_2 = Jw$ wird, lässt sich verschiedentlich erfüllen. Man kann dem Motor kleinere Eisenquerschnitte im Gestell und Anker geben, oder man kann die Ankerrückwirkung in beiden Maschinen entsprechend verschieden wählen oder man giebt dem Motor weniger Serienwindungen. Um Pendelungen bei Belastungsänderungen zu vermeiden, ist es ratsam parallel zu der Erregerwicklung von Motor und Generator einen induktionsfreien Widerstand zu legen, der zugleich als Tourenregulator benutzt werden kann, oder kurzgeschlossene Windungen als Dämpfer auf die Pole zu legen. Bei diesen letzten Vorsichts-

1) Nach E. A.-G. vorm. SCHUCKERT & Co.

massregeln lässt sich eine gute Übertragung auch noch ausführen, wenn nicht genau $E_1 - E_2 = JW$.

Wird ein Serienmotor mit konstanter Stromstärke gespeist, so ist sein Drehmoment bei gegebener Bürstenstellung konstant. Die Tourenzahl ist

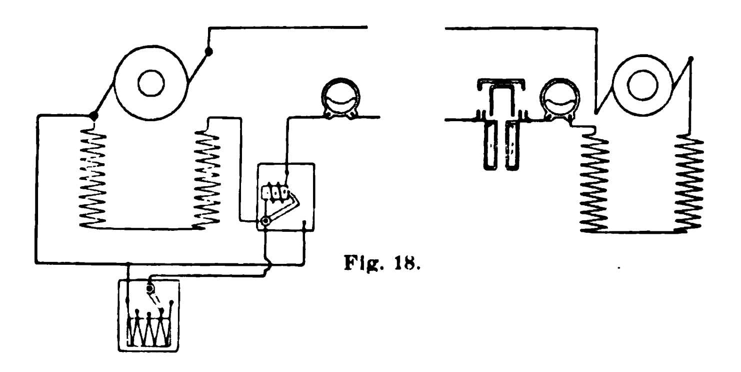


Fig. 18.

annähernd proportional der Klemmenspannung. Ist letztere konstant, so lässt sich die Tourenzahl durch Verschieben der Bürsten aus der neutralen Zone

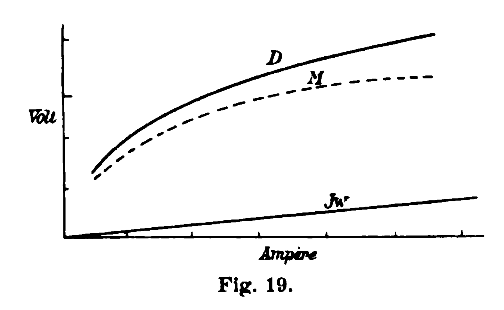



Fig. 19.

steigern, da dadurch die wirksame Leiterzahl $Z$ und durch Rückwirkung auch $K$ verringert wird (Gleichung 3). Bei Bürstenverschiebung und konstanter Stromstärke nimmt auch das Moment $M$ aus gleichem Grunde mehr und mehr ab.

### β) Nebenschlussmotor.

§ 16. Nebenschlussmotor.

Für den Nebenschlussmotor sind die beiden Grundgleichungen

$$u = (E_k - J_a w) \frac{60 \cdot 10^8}{Z \cdot K} \frac{a}{p} \quad \ldots \ldots \quad (20\text{a})$$

$$M = \frac{p}{61{,}6\,a} J_a Z K \cdot 10^{-8} \quad \ldots \ldots \quad (21\text{a})$$

Dabei ist $K$ bei konstanter Netzspannung so gut wie konstant, nur die Ankerrückwirkung bedingt eine kleine Veränderung mit der Belastung. Das Glied $E_k - J_a w$ nimmt mit der Belastung nur wenig ab, so dass die Tourenzahl des Nebenschlussmotors bei allen Belastungen annähernd konstant bleibt; der durch $J_a w$ bedingte Tourenabfall ist bei den üblichen Motoren je nach der Grösse 10—1°/₀. Ein Nebenschlussmotor läuft mit konstanter Touren-

zahl, wenn er von einer entsprechend übercompoundierten Dynamo betrieben wird. Das Drehmoment $M$ ist nur der ersten Potenz des Stromes proportional. In Kurve $N$ (Fig. 14) ist die Tourenzahl $u$ in Abhängigkeit des Momentes $M$ bei konstanter Klemmenspannung gezeichnet. Verändert man den Erregerstrom $J_n$ des Nebenschlussmotors, so erhält man bei gleichbleibender Ankerspannung den Verlauf Fig. 20 für die Tourenzahl; in die Figur ist für die als Dynamo betriebene Maschine die $E$-Kurve für konstante Tourenzahl eingetragen.[1])

§. 17. Elektrodynamisches Paradoxon.

Treibt man einen Nebenschlussmotor von einer übercompoundierten Dynamo an, so lässt sich genau konstante Tourenzahl bei jeder Belastung erzielen, wenn die Dynamospannung mit der Belastung stetig um den Abfall $J_a w$ des Motorankers steigt. Beim Arbeiten eines solchen Systemes kann man jedoch eine eigentümliche Erscheinung wahrnehmen und zwar besonders, wenn die Hauptstromwicklung der Dynamo gegenüber der Nebenschlusswicklung kräftig ist. Schaltet man nämlich den Nebenschlussmotor ein, so hat die Dynamo zunächst einen sehr starken Anlaufstrom für den Motoranker zu liefern, da das Motorfeld wegen der hohen Selbstinduktion nur langsam entsteht. Die Dynamo compoundiert nun stark über, d. h. erzeugt eine hohe Klemmenspannung. Sobald der Motor voll erregt ist, nimmt der Ankerstrom wieder stark ab, ebenso die Dynamospannung, der Motor hat aber soviel lebendige Kraft bekommen, dass seine Tourenzahl höher bleibt als der abnehmenden Klemmenspannung entsprechen würde. Er arbeitet als Dynamo auf den primären Generator zurück, schickt einen verkehrten Strom durch die Serienwicklung des letzteren und polarisiert denselben um. Dadurch wird der Motor jedoch rasch so geschwächt, dass er zunächst zur Ruhe kommt und dann rückwärts läuft. Es stellt sich ein fortwährendes Hin- und Herwogen des Motors von Vorwärts- und Rückwärtslauf ein, das von Gérard-Lescuyer elektrodynamisches Paradoxon genannt wurde (Kapp).

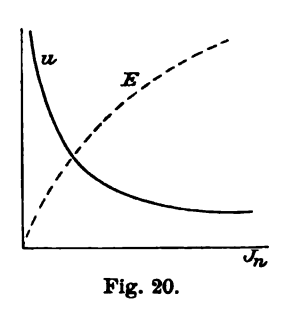


Fig. 20.

§. 18. Nebenschlussmotoren von Sengel und Sayers.

Sengel hat in E. T. Z. 1898 angegeben, den Nebenschlussmotor von einer Hauptklemme und einem Schleifringe aus zu erregen, der mit einem beliebigen Punkte der Wicklung verbunden ist. Bei Stillstand des Motors liegt dann an der Erregung die Klemmenspannung $E_k$ bezw. im ungünstigsten Falle $E_k - J_a w$, wenn $J_a$ der Ankeranlassstrom ist. Sobald der Motor läuft, entsteht an dem Schleifring eine zwischen 0 und $E_k$ schwankende elektromotorische Kraft, welche in der Erregerwicklung der hohen Selbstinduktion halber einen nahezu glatten Strom erzeugt, der $\frac{E_k}{2}$ proportional ist. Dadurch erreicht man, dass beim Anlauf der Erregerstrom doppelt so gross ist wie bei Dauerbetrieb, man steigert damit beim Anlauf die Kraftlinienzahl um 25—30 % und ebenso das Moment $M$.

Den gleichen Vorteil erreicht Sayers dadurch, dass er die Erregung von einer Hauptbürste und von einer zwischen den Hauptbürsten liegenden

1) Die Erregerwicklung wird für Nebenschlussmotoren von hoher Klemmenspannung besonders bei geringer Leistung kaum mehr ausführbar. Kleine Motoren haben deshalb oft Hauptstromerregung.

Hilfsbürste abnimmt. Überdies ist es dabei möglich, die Ankerrückwirkung zur Konstanthaltung der Tourenzahl bei variabler Belastung zu benutzen, wenn man den Erregerstrom von **dem** Teil des Ankers abnimmt, dessen Feld durch die Ankerrückwirkung geschwächt wird.

### $\gamma$) Compoundmotor.

§ 19. Compoundmotor für konstante Touren.

Mit einer **gemischten** Wicklung für Gleichstrommotoren (Nebenschluss- + Serienwicklung) kann man zwei Wirkungen erzielen:

1) Konstanz der Tourenzahl bei allen Belastungen.
2) Grosses Anzugsmoment.

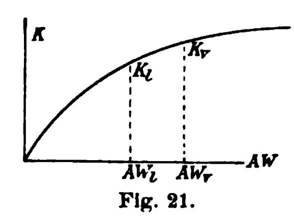


Fig. 21.

Da nach Gleichung (3) zur Erzielung einer konstanten Tourenzahl mit zunehmendem $J$ das Feld $K$ abnehmen muss, so muss zur Erfüllung der Forderung (1) die dicke Wicklung der Nebenschlusswicklung entgegenwirken. Die Grösse der $AW$-Zahl bestimmt man aus der Charakteristik (Fig. 21) folgendermassen. Für Leerlauf ist die Kraftlinienzahl $K_l$

$$K_l = \frac{a \cdot 60 \cdot 10^8}{p} \frac{E_k}{u Z},$$

bei Vollast muss sein

$$K_v = \frac{a \cdot 60 \cdot 10^8}{p} \cdot \frac{E_k - J_a w}{u Z}.$$

Zu $K_l$ und $K_v$ kann man aus der Charakteristik die Werte $AW_l$ und $AW_v$ pro Pol entnehmen. Nun bildet man sich noch die Anker-$AW$

$$AW_a = c \cdot \frac{J_a \cdot Z}{2a \cdot 2p}$$

($c = 0{,}9$ bis $1{,}2$) und konstruiert aus $AW_a$ und $AW_v$ ein Dreieck $AW_r \,/\, AW_a \,/\, AW_v$ mit einem $\sphericalangle\,(AW_a,\ AW_v) = 90^0$ oder $90^0 - \alpha$, je nachdem der Bürstenrückschub 0 oder $\alpha$ Grad ist. Die Nebenschlusswicklung hat dann $AW_l$ Ampèrewindungen, d. h. $z_n = \frac{AW_l}{J_n}$ Windungen und die dicke Wicklung eine Windungszahl

$$z_s = \frac{AW_r - AW_l}{J}$$

zu bekommen. ($J$ = Hauptstrom, $J_a$ = Ankerstrom).

Solange Proportionalität zwischen $K$ und $AW$ herrscht, lässt sich durch eine einfache Entwicklung finden, dass das Verhältnis $\frac{z_n}{z_s}$ der Windungszahl der Nebenschlusswicklung zu der der Serienwicklung sein muss

$$\frac{z_n}{z_s} = \frac{w_n}{w + w_s} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

wenn $w_n$ der Nebenschlusswiderstand, $w$ der Ankerwiderstand und $w_s$ der Widerstand der Serienwicklung ist. Jackson giebt für $z_s$ folgende Beziehung:

$$z_s = \frac{1-a}{100\,a}\,x\,z_n + z_g - \frac{z_n J_n w}{a\,(E_k - J_a w)}$$

wobei

$$a = \frac{z_n J_n}{\sqrt{(z_Q J_a)^2 + (z_n J_n)^2}}, \quad x = \frac{J_n}{J},$$

$z_Q$ = Querwindungen des Ankers, $z_g$ Gegenwindungen des Ankers, $a = \sim 0{,}8$.

Da das Feld eines selbstregulierenden Compoundmotors mit der Belastung geschwächt wird, so leistet derselbe bei gleicher Güte bezüglich Funkenbildung 5—10% weniger als ein Nebenschlussmotor.

§ 20. Compoundmotor für grosses Moment.

Für die obige zweite Forderung eines vergrösserten Anzugsmomentes muss die dicke Wicklung im gleichen Sinne wie die Nebenschlusswicklung geschaltet sein. Hat man bei Leerlauf die Nebenschluss-$AW$-Zahl $AW_n$, so kommt bei Belastung mit dem Strome $J$ noch dazu $AW_s = JZ_s$; zu $AW_n + JZ_s$ gehört eine grössere Kraftlinienzahl $K$ als zu $AW_n$ allein, was die Steigerung des Momentes erklärt. Die Steigerung in $K$ ist für die praktischen Fälle in der Regel wesentlich geringer als der Zuwachs an $AW_s$, da das Feld schon durch die $AW_n$ stark gesättigt ist. Je mehr man Serienwindungen in gleichem Sinne wie die $AW_n$ verwendet, desto mehr nähert sich die Maschine dem reinen Serienmotor, z. B. auch mit Rücksicht auf den Tourenabfall. Eine zusätzliche gleichsinnige Serienwicklung ist aber nicht allein wegen der Steigerung des Anzugsmomentes erwünscht, sie dämpft auch die Funkenbildung bei belastetem oder überlastetem Anlauf, indem sie die Ankerrückwirkung prozentuell verringert. Es ist deshalb in der Regel sehr zweckmässig, Nebenschlussmotoren mit einer Lage dicker Windungen zu versehen, die bei normaler Last für viele Fälle noch keinen zu grossen Tourenabfall zeigen. In Fig. 14 ist die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Belastung $M$ (Drehmoment) nach Frölich bei konstanter Klemmenspannung und in Fig. 15 bei konstanter Stromstärke für verschiedene Arten von Erregerwicklungen dargestellt. $N$ bedeutet Nebenschlusswicklung, $R$ Reihen(Serien) wicklung, $R$—$N$ Differentialcompoundwicklung mit vorwiegender Reihenwicklung u. s. w.

## h) Drehrichtung.

§ 21. Drehsinn.

Den Drehsinn eines Motors kann man nach der bekannten Fingerregel (Fig. 3) bestimmen. Giebt man dem Mittelfinger der linken Hand die Richtung des Ankerstromes, dem Zeigefinger die Richtung der Kraftlinien, so ergiebt der Daumen die Drehungsrichtung. Die Kraftlinienrichtung findet man aus der Richtung des Erregerstromes folgendermassen: Man denkt sich die Erregerspule mit der rechten Hand umfasst, so dass der Erregerstrom in Richtung der vier umfassenden Finger fliesst, dann laufen die Kraftlinien in Richtung des gestreckten Daumens.

Speist man eine Nebenschlussdynamo derart von einem äusseren Netze, dass ihr Dynamopluspol an den Pluspol des Netzes gelegt wird, so dreht sich die Maschine als Motor im gleichen Sinne, wie sie als Dynamo angetrieben wurde; beim Serienmotor findet bei dieser Behandlung eine Umkehr des Drehsinnes statt, da das Feld entgegengesetzt magnetisiert wird.

Um den Drehsinn eines Gleichstrommotors zu ändern, hat man entweder den Ankerstrom oder die Feldrichtung, d. h. den Erregerstrom umzukehren. Ändert man beide um, so läuft der Motor in gleichem Sinne weiter. Vertauscht man an einem Nebenschluss- oder Serienmotor die Netzpole, so bleibt der Drehsinn bestehen.

## III. Anlasser.

**22. Theorie des Anlassers.**

Würde man an einen Gleichstrommotor, der still steht, die volle Netzspannung legen, so würde ein Strom entstehen der zehn- bis hundertmal grösser wäre als der normale, da die gegenelektromotorische Kraft erst mit der Bewegung allmählich entsteht und der Ankerwiderstand bei normalem Strome nur einen Spannungsabfall aufnimmt, der wenigen Prozenten der Netzspannung entspricht. Während bei Serienmotoren die Sache insofern noch etwas günstiger liegt, als der starke Anlassstrom auch durch die Erregerwicklung fliesst, also das Feld verstärkt und zugleich in dieser Wicklung einen Abfall erleidet, wird bei Nebenschlussmotoren das Schenkelfeld langsam und in der Regel bei der starken Stromabnahme nur geschwächt erregt. Es ist also zum Anlassen eines Motors vor den Anker ein **Anlasswiderstand** zu legen, der allmählich mit zunehmender Umlaufszahl[1]) abzuschalten bezw. kurzzuschliessen ist. Das Feld ist in jedem Falle vorher oder gleichzeitig mit dem Schluss des Ankerkreises voll zu erregen.

Der Anlasswiderstand ist so zu bemessen, dass zunächst beim Schliessen der Leitung je nach der Empfindlichkeit des Netzes der maximalerforderliche Anlassstrom $(J_a)_{max}$ oder ein Bruchteil davon, der $J_a$ heisse, ensteht, d. h. der gesamte Anlasswiderstand $W_1$ ist bei der Klemmenspannung $E_k$:

$$W_1 = \frac{E_k}{J_a}.$$

Ist nun $J_a$ nur ein Bruchteil des maximalerforderlichen Anlassstromes, so wird der Motor mit $W_1$ nicht anlaufen; es werden jetzt noch einige Stufen abgeschaltet, die nur zur Dämpfung des Anlassstromes dienen, bis $(J_a)_{max}$ erreicht ist und der Motor anläuft. Der Motor kommt nun bei diesem Vorschaltwiderstand nur auf eine geringe Tourenzahl, es muss dann eine zweite, dritte u. s. w. Stufe kurzgeschlossen werden. Für die Bemessung der Abstufungen gilt die Regel, dass die Stromschwankungen von Stufe zu Stufe gleich sein und eine gewisse Grösse nicht überschreiten sollen. Diese Anordnung ergiebt zugleich pro Kontakt durchweg die gleiche prozentuelle

1) Bei konstantem Anlasswiderstand lässt sich das allmähliche Ansteigen der Tourenzahl $u_t$ von $o$ auf $u$ ausdrücken durch

$$u_t = u\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

wobei $t$ die Zeit ist und $\tau$ von dem Anlasswiderstand, dem Motorträgheitsmoment und den elektrischen Abmessungen abhängt.

Tourensteigerung. Die Berechnung vollzieht sich graphisch[1]) an Hand der Fig. 22, die den Stromverlauf in Abhängigkeit der ansteigenden Tourenzahl wiedergiebt. Auf dem ersten Kontakt entstehe der Strom $J_{max}$ bei

$$W_1 = \frac{E_k}{J_{max}} \qquad (23)$$

Der Motor läuft an und erreicht die Tourenzahl[2]) $u_1$ bei dem Strom $J_{min}$, dann wird weiter geschaltet und der Strom steigt wieder auf $J_{max}$ bei einem

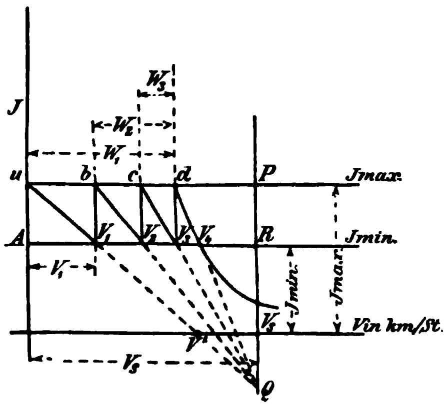



Fig. 22.

Gesamtwiderstand $W_2$. Die Tourenzahl erreicht $u_2$ ... Die einzelnen Grössen hängen dabei folgendermassen zusammen. Es sei

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \frac{J_{min}}{J_{max}} \\ \beta &= \frac{K_{min}}{K_{max}} \end{aligned}\right\} \qquad (24)$$

Die Kraftlinienzahl $K_{min}$ gehöre zu $J_{min}$, $K_{max}$ zu $J_{max}$, beide Werte von $K$ sind bei Serienmotoren wesentlich verschieden, bei Nebenschlussmotoren ist $K_{max}$ etwas kleiner als $K_{min}$. Auf der ersten Widerstandsstufe wird die Umdrehungszahl $u_1$ erreicht bei $J_{min}$:

$$u_1 = \frac{E_k(1-\lambda)}{\frac{Z}{60 \cdot 10^8} K_{min}} \qquad (25)$$

Für irgend eine Stufe die $n^{te}$ gilt

$$u_n - u_{n-1} = (\lambda\beta)^{n-1} u_1 \qquad (26)$$

und für die Widerstände pro Stufe

$$W_{n-1} - W_n = (\lambda\beta)^{n-2}(W_1 - W_2) \qquad (27)$$

1) Nach F. Erens, E. T. Z. 1899. Ausführliches siehe F. Niethammer: Elektrisch betriebene Hebe- und Transportmaschinen 1900 (J. Springer & R. Oldenbourg).

2) In der Fig. 22 ist die Tourenzahl $u$ durch die Geschwindigkeit $V$ ersetzt.

$W'_1$ ist oben angegeben

$$W_1 = \frac{E_k}{J_{max}}.$$

$$W_2 = W_1 - \frac{Z}{60 \cdot 10^8} \frac{u_1 K_{max}}{J_{max}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (28)$$

Die letzte Stufe ist der Ankerwiderstand $W$.

In der Fig. 22 ist

$$OA = J_{min}, \; Oa = J_{max}.$$

$$u_e = \frac{u_1}{1 - \lambda\beta}$$

ist die ideelle Umdrehungszahl bei $W = 0$ und bei unendlich vielen Stufen; $u_1$ folgt aus (25), $au_1$ schneidet das Lot $PR$ in $Q$, von welchem Punkte aus die verschiedenen Strahlen gehen, die $u_2, u_3 \ldots W_2, W_3 \ldots$ u. s. w. bestimmen. Für $Q$ ergiebt sich

$$\frac{QR}{QP} = \lambda\beta.$$

Bei Nebenschlussmotoren ist $\beta = 1$ und $Q$ und $u_e$ fallen zusammen.

Die Zahl $m$ der Stufen hängt mit $\lambda$, $u_e$, $u_1$ und $W$, $W_1$ zusammen durch

$$\frac{J_{min}}{J_{max}} = \sqrt[m]{\frac{u_1}{u_e}} = \sqrt[m]{\frac{W}{W_1}} \quad . \; . \quad (29)$$

Fig. 23.

Die Geschwindigkeiten und Widerstände pro Stufe und diejenigen je total von einer Stufe ab folgen einer geometrischen Reihe.[1])

Das Arbeitsdiagramm zweier hintereinander geschalteter Serienmotoren beim Anlauf, stationären Betrieb und Abstellen zeigt Fig. 23. In Abhängigkeit der Zeit $t$ ist die Geschwindigkeit $v$, der Stromverbrauch $J$ und der zurückgelegte Weg $s$ eingezeichnet. Für $s$ gilt

$$s = \int v\,dt.$$

Da die Nutzleistung eines Motors im wesentlichen dem Produkt $EJ$ proportional ist, die gegenelektromotorische Kraft aber im Augenblick des Anfahrens Null ist und erst allmählich auf ihren Vollwert $E$ ansteigt, so dass sie im Mittel während des Anlaufes zu $\frac{E}{2}$ angenommen werden kann, so ist die nützliche Anlaufsenergie bei der Anlaufszeit $t$

$$t \cdot \frac{E}{2} \cdot J.$$

Aufgewendet muss werden

$$t \cdot E \cdot J,$$

d. h. beim Anlauf gehen, da noch die unvermeidlichen Verluste im Motor dazukommen, mehr als $50\%$ der aufgewendeten Arbeit verloren.

1) Verschiedene weitere Diagramme siehe F. Niethammer, loc. cit. p. 132 ff.

# IV. Bremsung.

Jeder Elektromotor kann, solange ihm eine gewisse lebendige Kraft innewohnt oder sofern er angetrieben wird, als Dynamo arbeiten, eine Eigenschaft, die vielfach zum Bremsen[1]) benutzt wird. Die Bremsung kann auf dreierlei Weise geschehen:

1) durch Arbeiten des Ankers auf Widerstand,
2) durch Arbeiten des Ankers ins Netz zurück,
3) durch Gegenstrom.

§ 23. Bremsung auf Widerstand.

Jeder Nebenschluss- und Serienmotor, aber besonders der letztere eignet sich zu der ersten Bremsart und zwar taugt der Serienmotor besser dazu, weil er bei Kurzschluss nicht ausgeht wie der Nebenschlussmotor, der dann seine EMK verlieren kann. Das Bremsen auf Widerstand ist nicht wie die zweite Bremsart an eine bestimmte Tourenzahl gebunden. Bei Serienmotoren muss beim Übergang von Nutzarbeit auf Bremsung die Verbindung von Feld und Anker vertauscht werden, da dieselben sich anderenfalls entmagnetisieren. Die Bestimmung der einzelnen Widerstandsstufen geschieht nach Erens (E. T. Z. 1898) wie bei Anlassern; bei hoher Tourenzahl ist viel Widerstand vorzuschalten, mit dem Abnehmen desselben ist der Widerstand mehr und mehr kurzzuschliessen. Bei den gleichen Bezeichnungen wie bei den Anlassern findet sich nach Fig. 24 für die Bremsung, die mit der Tourenzahl $u_1$ einsetzt, folgendes. Der gesamte Bremswiderstand ist

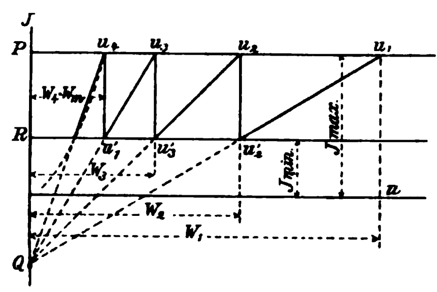



Fig. 24.

$$W_1 = \frac{\frac{Z}{60 \cdot 10^8} K_{max} u_1}{J_{max}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (30)$$

irgend eine Stufe, z. B. die $m^{te}$ erhält den Widerstand

$$W_m = (\lambda \beta)^{m-1} W_1, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (31)$$

wobei

$$u_m = (\lambda \beta)^{m-1} u_1 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (32)$$

und

$$u_m = 0 \quad {}_{m = \infty} \text{ bei } W_m = 0.$$

In Fig. 24 ist $OR = J_{min}$, $OP = J_{max}$ (beide gewählt). $Pu_1 = u_1$ (gegeben), $Ru'_2 = u_2 = \beta u_1$, $u_1 u_2'$ bestimmt $Q$; $OR / QP = \lambda \beta$.

1) Ausführliches hierüber ist in F. Niethammer, loc. cit. p. 237 u. s. w. zu finden.

Serienmotors ist grösser als beim Nebenschlussmotor, für das $1^1/_2$fache des normalen Stromes ist das Anzugsmoment schon annähernd doppelt so gross wie das normale.

3) Die Funkenbildung des Serienmotors ist geringer als beim Nebenschlussmotor, da Ankerstrom und Feldstärke miteinander ansteigen. Die An- und Auslaufszeit und -energie sind beim Serienmotor geringer als bei Nebenschlusserregung.

In Fig. 16 und 17 sind einige Betriebskurven[1]) von Serienmotoren gezeichnet. In Fig. 16[2]) ist die Klemmenspannung $E_k$ (Ordinaten) und die Stromstärke $J$ (Abscissen) variabel, dagegen die Tourenzahl konstant angenommen und dann eine Kurvenschar für die Pferdestärken bestimmt, die es ermöglicht jede Pferdestärkenzahl mit einem beliebigen Produkt $E_k \times J$ zu erreichen, z. B. 3 PS mit 100 Volt $\times$ 22 Amp. oder 73 Volt $\times$ 30 Amp.

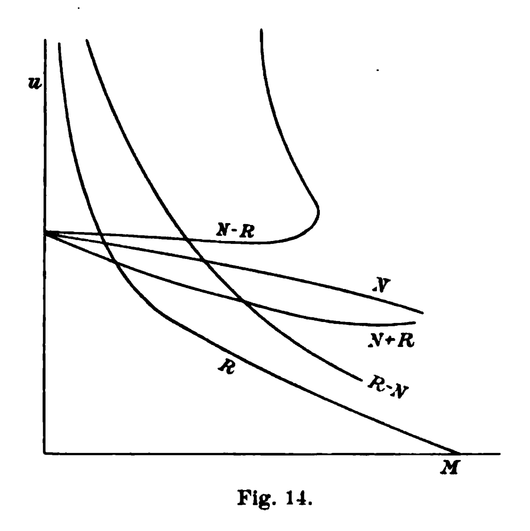


Fig. 14.

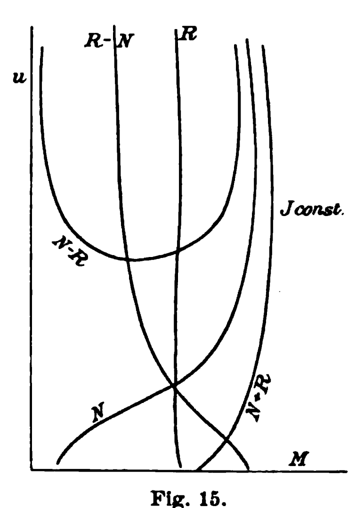


Fig. 15.

oder 56 Volt $\times$ 40 Amp. u. s. w. In Fig. 17[3]) ist aus der Kurve der Kraftlinien $K = f(J)$ mit Hilfe der etwas abfallenden Geraden

$$Ku = (E_k - Jw) \frac{60 \cdot 10^8}{Z} \frac{a}{p}$$

für konstantes $E_k$ die Kurve der Tourenzahl $u$ in Abhängigkeit von $J$ bestimmt. Die $K$-Kurve ist durch Fremderregung, z. B. bei $u_1$-Touren aufgenommen. Bei irgend einem Strome $J_x$ ergiebt sich nun aus dem Wert von $(Ku)$ und dem von $u_1$ durch Division ein Wert

$$K'_1 = \frac{(Ku)_x}{u_1}.$$

Der Motor hat dann bei diesem Strome $J_x$ eine Tourenzahl

$$u_x = \frac{K_x}{u_1 K'_1}.$$

($K_x$ ist aus der $K$-Kurve entnommen.)

1) Betriebskurven, weil sie das Verhalten im Betrieb charakterisieren.
2) Siehe KAPP, Elektrische Kraftübertragung.
3) RÖSSLER, Die Gleichstrommotoren.

## b) Serienmotor.

§ 26. Tourenregulierung des Serienmotors.

Für die Tourenänderung von Serienmotoren sind drei Methoden üblich, die beliebig kombiniert werden können.

a) Es wird vor den Motor abgestufter Widerstand gelegt (entspricht No. 1), eventuell wird der Widerstand auch in verschiedenen Gruppen (parallel, hintereinander u. s. w.) benutzt.

b) Es werden Erregerspulen bezw. Erregerwindungen abschaltbar angeordnet (entspricht No. 4) oder sie werden verschieden gruppiert.

c) Es wird parallel zur Erregerwicklung ein regulierbarer Widerstand gelegt, so dass der Erregerstrom geschwächt werden kann (entspricht ebenfalls No. 4).

Methode b und c sind wesentlich wirtschaftlicher im Betrieb als Methode a, die letztere verlangt jedoch kein so grosses Motormodell wie b und c, gleiche Leistung vorausgesetzt.

Bezüglich der Methode b sei bemerkt, dass bei drei Spulengruppen mit den Windungszahlen $Z_1$, $Z_2$, $Z_3$ und den Widerständen $w_1$, $w_2$, $w_3$ bei Hinter-

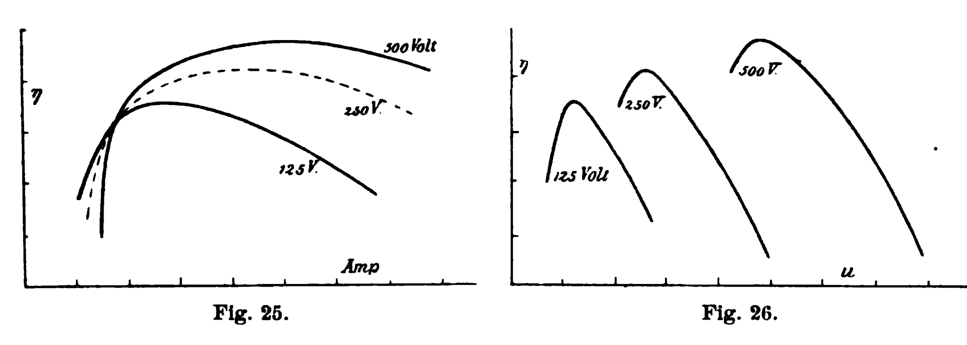



Fig. 25. Fig. 26.

einanderschaltung der Spulen die wirksame *AW*-Zahl $J(Z_1 + Z_2 + Z_3)$ ist, bei Parallelschaltung

$$J \frac{Z_1 w_2 w_3 + Z_2 w_3 w_1 + Z_3 w_1 w_2}{w_1 w_2 + w_2 w_3 + w_3 w_1},$$

dazwischen liegen entsprechende Zwischenwerte.

Wird eine Arbeitsmaschine von mehreren Serienmotoren angetrieben, so kann man dieselben parallel oder hintereinander gruppieren und damit die Tourenzahl in weiten Grenzen variieren (Serien-Parallel-System). In Fig. 5 und 6 sind die Betriebskurven für vier Serienmotoren der Central London Railway gezeichnet und zwar sind in Fig. 5 zwei Motoren hintereinander und diese zwei Gruppen zu zwei wieder parallel geschaltet. In Fig. 6 sind sämtliche Motoren parallel. Die Netzspannung ist 500 Volt. Diese Gruppierung bedeutet nichts anderes als eine Änderung der Klemmenspannung (siehe No. 1 oben). In Fig. 25—27 sind noch entsprechend dem Serien-Parallel-System eine Reihe Kurven für verschiedene Motorklemmenspannungen: 125, 250, 500 Volt aufgezeichnet (125 Volt = 4 Motoren in Serie, 250 Volt = 2 in Serie, 500 = alle parallel). Fig. 25 giebt den Zusammenhang der

dem Netz entnommenen Stromstärke mit dem Wirkungsgrad $\eta$, Fig. 26 denjenigen der Geschwindigkeit $u$ mit dem Wirkungsgrad $\eta$ und Fig. 27 denjenigen zwischen Drehmoment und Geschwindigkeit.

Will man bei Verteilung mit konstantem Strome bei verschiedener Belastung annähernd gleichbleibende Umlaufszahl eines Serienmotors erzielen, so versieht man denselben mit einem Centrifugalregulator (siehe Fig. 28,

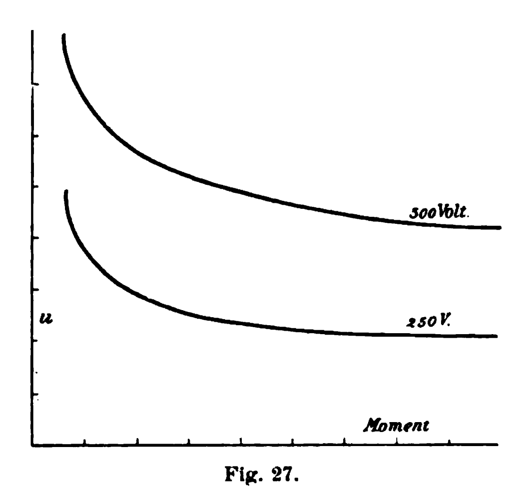



Fig. 27.

Ausführung der Cie de l'Ind. El. Genf): Das Centrifugalpendel wird durch den Motor angetrieben; eine Schnecke auf derselben Welle erteilt der Scheibe *A* eine pendelnde Bewegung. *A* trägt vier Klinken *a b a' b'*. Die gezahnte Scheibe *C* ist fest mit dem hinten sichtbaren Schleifkontakt verbunden, der

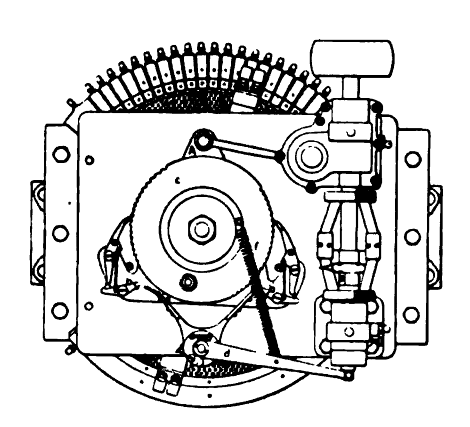


Fig. 28.

die Erregerwicklung durch einen abgestuften Widerstand nebenschliesst. Die Belastung ist immer proportional der Gegen-EMK. Je nachdem der Motor zu rasch oder zu langsam läuft, kommt die Klinke *a* oder *a'* mit *C* in Eingriff, dadurch dass der Hebel *d* im einen oder anderen Sinne bewegt wird und die Anschläge *b* und *b'* freigiebt. Die Spiralfeder *f* dient zur Dämpfung bezw. zur Verhinderung von Überregulierung.

### c) Nebenschlussmotor.

§ 27. Tourenänderung des Nebenschlussmotors.

Die Tourenzahl von Nebenschlussmotoren lässt sich bequem durch Schwächung des Erregerstromes bezw. der erregenden *AW* steigern (entspricht No. 4) und zwar bleibt bei dieser Steigerung der Wirkungsgrad angenähert konstant. Da durch eine Feldschwächung die Ankerrückwirkung prozentuell vermehrt wird, so ist die Tourensteigerung nach dieser Methode durch die Funkenbildung beschränkt. Soll die Tourenzahl im Verhältnis 1 : 2 oder mehr erhöht werden, so sind deswegen dazu Motormodelle nötig, die grösser zu wählen sind, als wenn es sich um dieselbe Leistung bei konstanter Tourenzahl handelt. Die Änderung der erregenden *AW* geschieht in der Regel durch Vorschalten von Widerstand vor die Erregerwicklung, hier und da auch dadurch, dass man eine Reihe parallelgeschalteter Erregerwicklungen abschaltbar anordnet. Man kann auch durch Anbringung eines Widerstandes parallel und eines solchen in Hintereinanderschaltung zur Erregerwicklung regulieren, ferner dadurch, dass man Erregerspulen gleichsinnig oder entgegengesetzt schaltet. — Handelt es sich nur um einen Nebenschlussmotor, der seinen besonderen Generator hat, so kann die Tourenzahl des ersteren durch Schwächung des Generatorfeldes in den weitesten Grenzen ökonomisch reguliert werden.[1])

Eine Tourenregulierung durch Änderung der Leiterzahl $Z$ (No. 3) wird gewöhnlich so ausgeführt, dass man den Motoranker mit zwei Wicklungen und zwei Kollektoren versieht, die in Parallel- oder Hintereinanderschaltung benutzt werden können.

Die Leiterzahl $Z$ lässt sich auch durch Bürstenverstellung oder durch Anbringung von Zwischenbürsten variieren.

Mehrleiteranlagen gestatten in einfacher Weise die Klemmenspannung $E_k$ (No. 1) oder die Erregung und damit die Kraftlinienzahl $K$ (No. 4) zu variieren und ergeben damit eine wirtschaftliche Regulierung.

Eine rationelle und wirtschaftliche Änderung der Kraftlinienzahl $K$ (No. 4) ergiebt sich durch Verstellen des Luftzwischenraumes und die damit verbundene Variation des magnetischen Widerstandes.

## VI. Beispiele moderner Gleichstrommotoren.

§ 28. Allgemeine E.-G.

Für Druckerpressen und ähnliche Antriebe, die Motoren mit niedriger Umlaufszahl (unter 300 Touren) bei geringen Leistungen von 10 PS und weniger erheischen, baut die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin die vierpolige Type Fig. 29. Der Bau ist sehr gedrängt. Die Stahlgusspole mit angegossenen Polschuhen sind je mit einer Schraube an das achteckige Gehäuse angeschraubt. Die Lager sind als einfache Bügel ausgebildet. Der Motor sitzt auf Gleitschienen. Für grosse Leistungen

1) Eine Tourenänderung, die dem Serien-Parallelsystem bei zwei Serienmotoren gleicht, ist bei Verwendung von zwei Nebenschlussmotoren auf derselben Achse dann möglich, wenn die beiden Anker hintereinander und die Erregung der einen Maschine umschaltbar angeordnet werden.

liefert dieselbe Firma mehrpolige Motoren der Form Fig. 30. Das Joch samt angegossenen Polen besteht aus Stahlguss. Die Polschuhe sind besonders aufgeschraubt. Die Hauptklemmen sind als isolierte Bolzen, die in das Gehäuse eingeschraubt werden, ausgebildet. Der Kohlenbürstenhalter ist in Band IV des Handbuches für sich gezeichnet.

§ 29. Maschinenfabrik Esslingen.

Der kleine Motor (Fig. 31) der Maschinenfabrik Esslingen hat Hufeisenform und weitausragende Bügellager. Er dient zum Antrieb von Schnellpressen und sitzt deshalb auf einer schwingenden Grundplatte und trägt an einem Ende eine elektrisch wirkende Bremse. Fig. 32 zeigt einen



Fig. 29. Langsamlaufender Motor der A. E.-G.

Umsteueranlasser mit Kohlenfunkenzieher. Die allerdings verlassene Motortype Fig. 33[1]) verdient insofern Interesse, als es eine Innenpol-Aussenpolmaschine ist. Die Skizze giebt einen $^1/_2$pferdigen, vierpoligen Motor, *A* sind die Innenpole, *B* die Aussenpole, dazwischen ist die Erregerspule untergebracht. *C* ist der rotierende Anker, *D* der Kollektor und *E* die Bürste.

§ 30. Helios.

Der zweipolige Motor der Helios E. A. G. (Fig. 34 und 35) für $^3/_4$ bis 1 PS besitzt nur eine unten liegende Erregerspule. Er ist vollständig eingeschlossen. Der obere Pol ist abnehmbar und die Lager sind geteilt, um den Anker einlegen zu können. Der Kollektor ist durch eine besondere

1 Nach KITTLER, Handbuch der Elektrotechnik.

Blechhaube abgeschlossen. In Fig. 34 ist zur Reduktion der Tourenzahl eine grosse Zahnradübersetzung vorgesehen; auf dem grossen Rade sitzt direkt eine Riemenscheibe. Schnitt und Bild eines 20pferdigen und eines



Fig. 30. Vierpoliger Motor der A. E.-G.

7pferdigen Kapselmotors für Hebezeugzwecke ist in Fig. 36 und 37 dargestellt. Das Gehäuse ist zweiteilig, der Kollektor mit 93 Lamellen ist durch eine abnehmbare Klappe zugänglich, die aber eine gewisse Ventilation zulässt; die Lager haben konsistente Schmierung. Beachtenswert ist die Ventilation durch den Anker und die Luftlöcher an den Lagern, ferner die als

Spritzringe ausgearbeiteten Muttern, die Klappen an dem Unterteil des Motors, der einfache Kohlenbürstenhalter, dem die Bürste durch bequemes Zurückklappen der Feder entnommen werden kann und schliesslich die Spulenhalter. Der Anker hat 47 Nuten. Von den vierpoligen Motoren Fig. 38 bis 40 leistet Fig. 38 etwa 11 PS, Fig. 39 und 40 etwa 16,5. Die



Fig. 31. Gleichstrommotor der Maschinenfabrik Esslingen.



Fig. 32. Anlasser der Maschinenfabrik Esslingen.

Stahlpole sind in das Gusseisengehäuse eingeschraubt und durch eine Nute fixiert. Die untere Jochringhälfte, Lager und Grundplatte bilden in Fig. 40

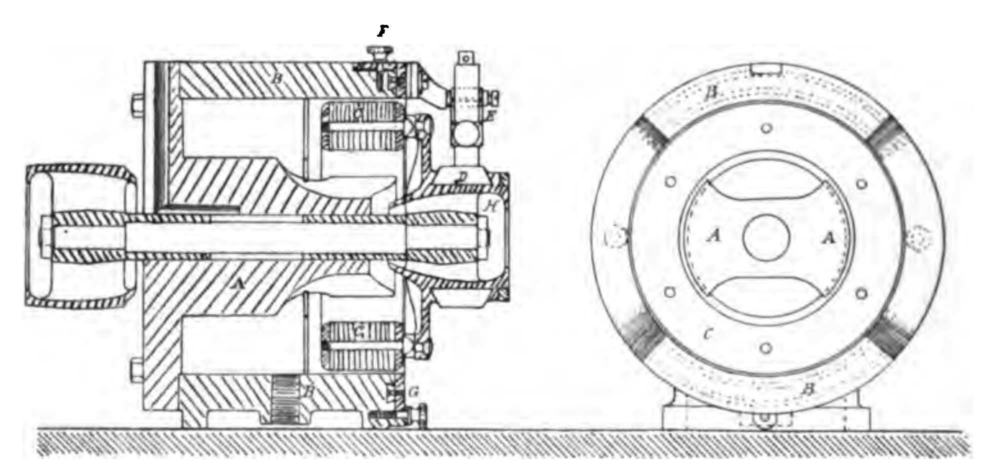


Fig. 33. Aussen-Innenpolmotor der Maschinenfabrik Esslingen.

ein Stück, in Fig. 38 sind Lagerschilder vorgesehen. Der letztere Motor sitzt auf Spannschlitten. Die Erregerspule (Fig. 39) trägt Nebenschluss- und Hauptstromwicklung.

§ 31. Körting.

Die zweipolige Motortype (Fig. 41) und der sechspolige Motor (Fig. 42) (E. T. Z. 1900, p. 617) der Gebrüder Körting waren in Paris ausgestellt. Das Gestell des kleinen Motors ist an einen Ventilator angeschraubt. Ventilatorflügel und Anker sitzen auf derselben Achse mit zwei Lagern. Der

Gleichstrommotor

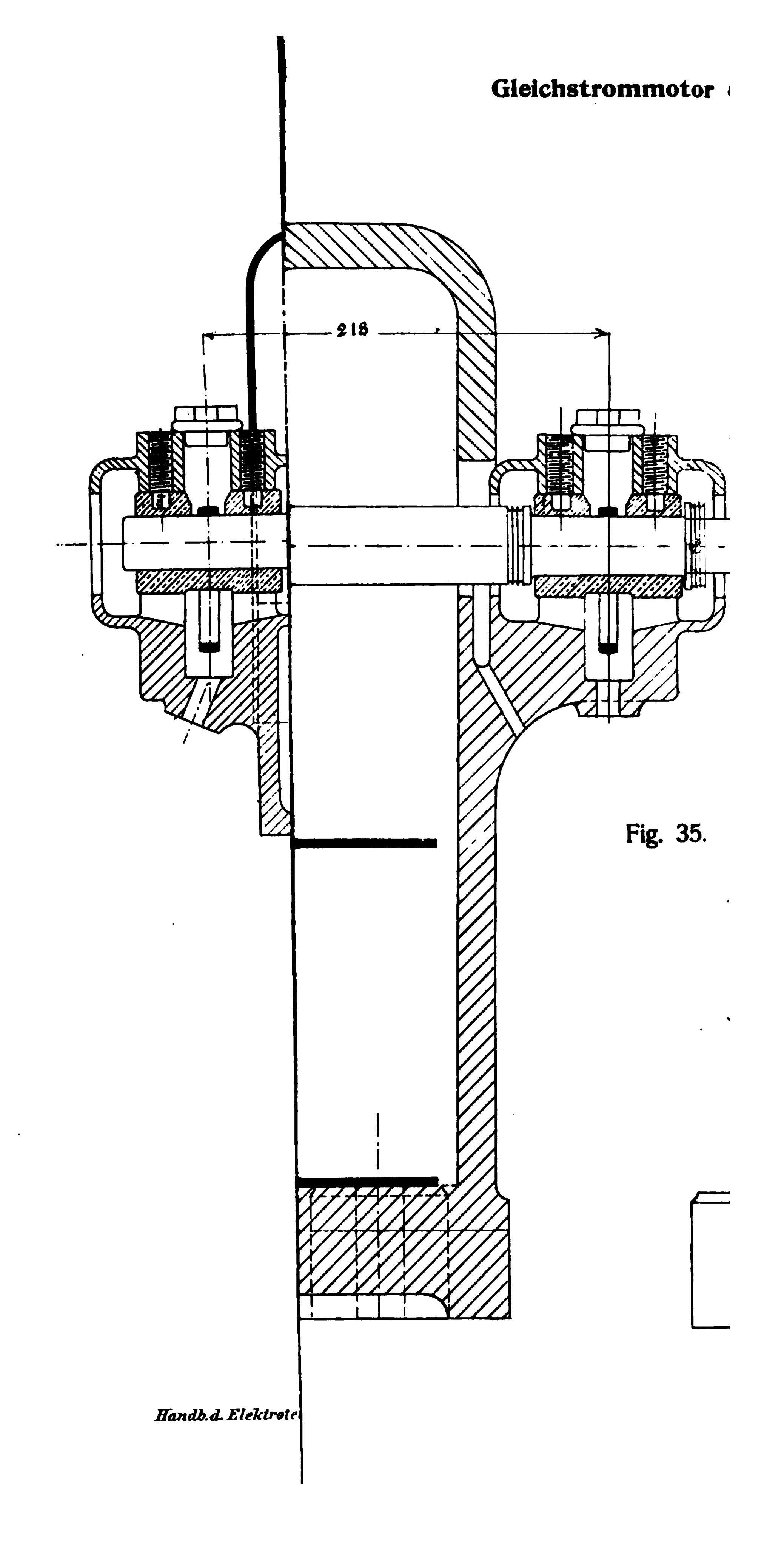



Fig. 35.

der Helios E. A.-G.

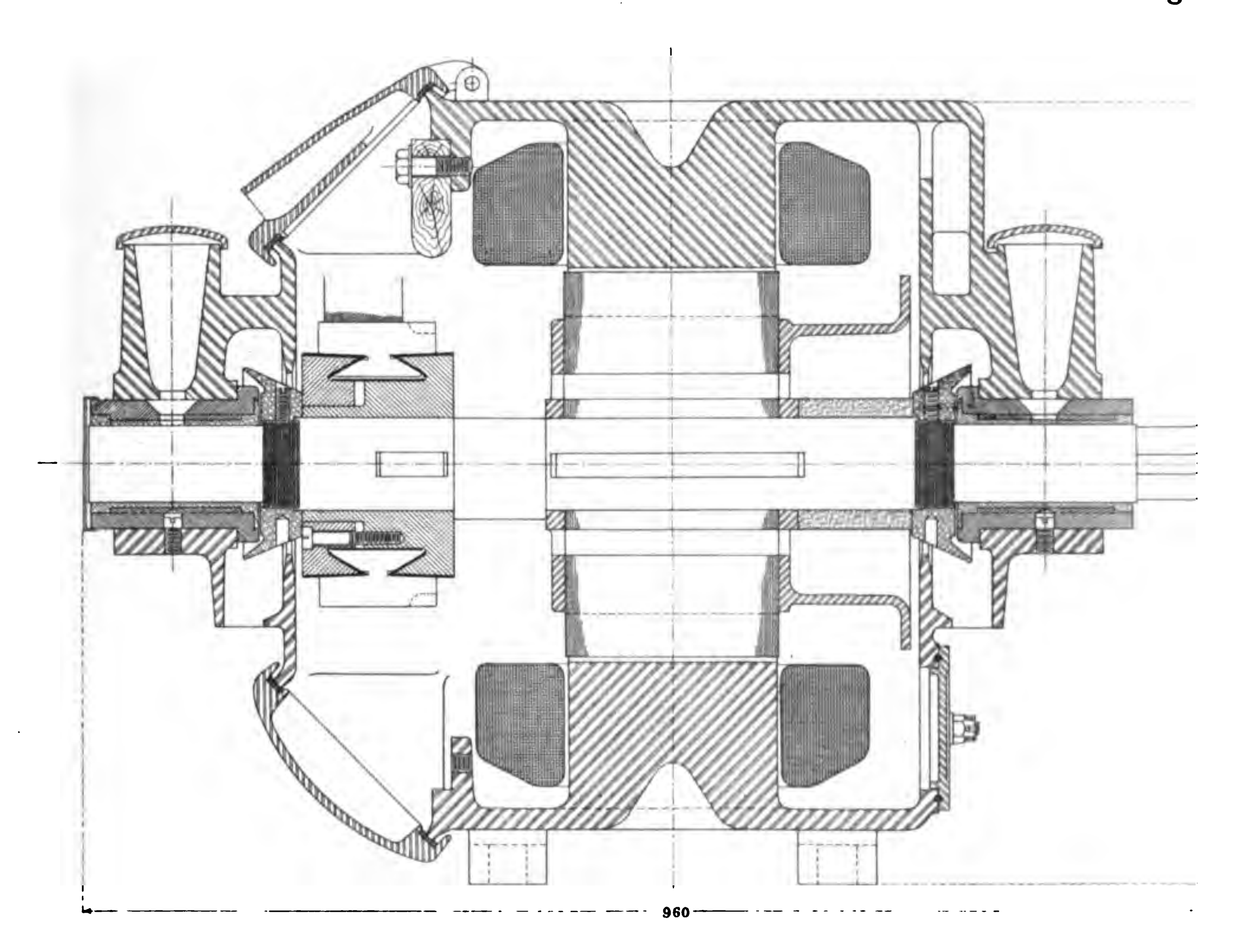
285

5/8"

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

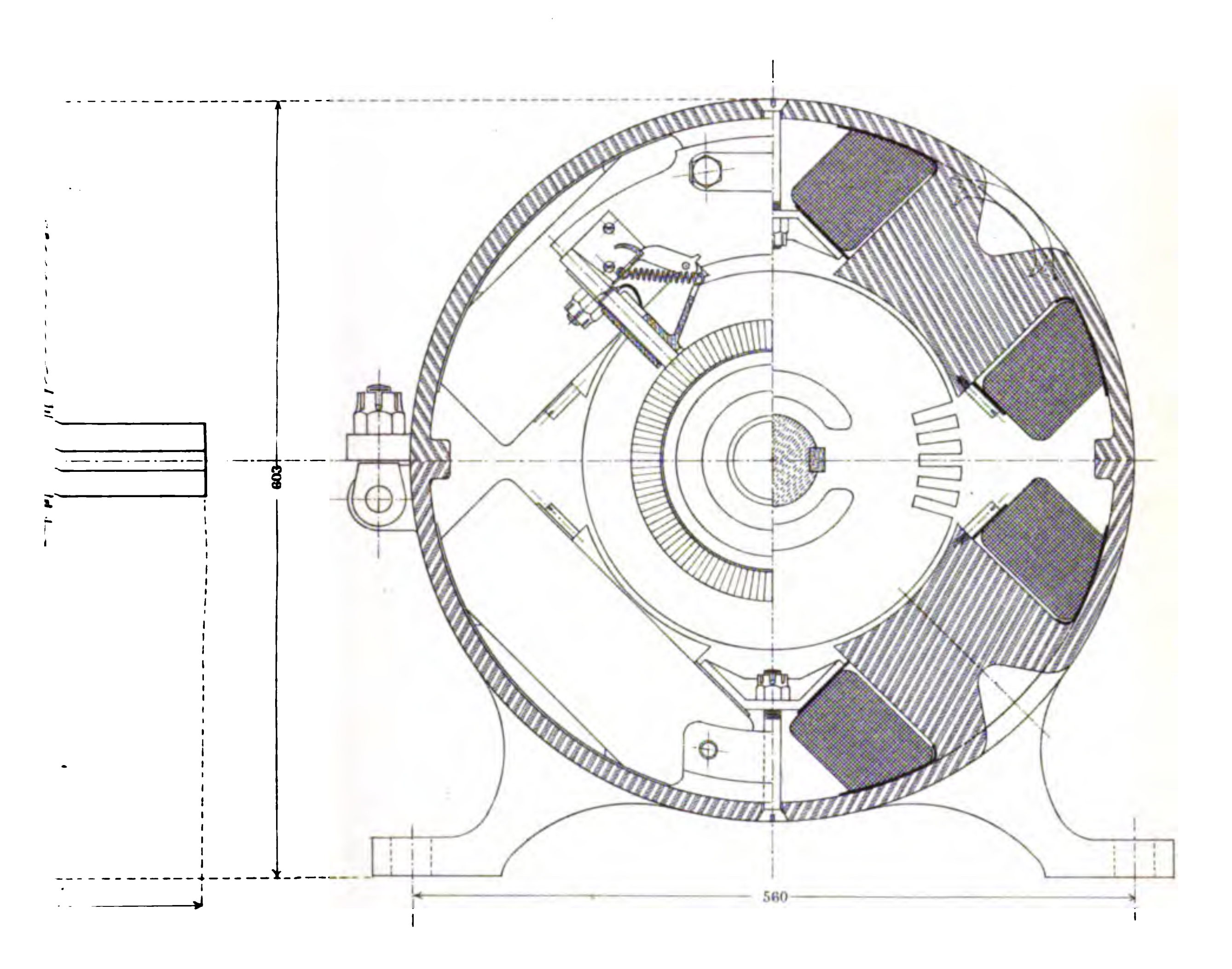
**Kapselmotor der**

Fig.



**Helios B. A.-G.**

**36.**




Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

grössere, langsamlaufende Motor zeigt auf jeder Seite ein dreiarmiges Lagerschild. Das Gehäuse samt Polen (ohne Polschuhe) ist offenbar gusseisern. Die Ankerbleche werden durch Nieten zusammengehalten. Es sei auf den Riemenspanner und den Ölstandszeiger aufmerksam gemacht.



Fig. 34. Kleiner Gleichstrommotor von Helios.

§ 32. Kummer.

Fig. 43 giebt einen zweipoligen Motor mit Tischventilator der A. G.-E. vorm. O. L. KUMMER & Co. Das Gestell ist hufeisenförmig; die Bürstenkonstruktion ist sehr einfach. Die grössere zweipolige Type (Fig. 44—46)



Fig. 37. Kapselmotor der Helios E. A.-G.

derselben Firma wird eisengeschlossen ausgeführt. Die Ankerbleche sind auf einem Messingarmstern mittels vier Rundkeilen befestigt. Die Erregerspulen sind zur Reduktion der Feldstreuung tief über den Anker geschoben. Die Pole werden zur Verminderung der Ankerrückwirkung eingeschnürt.

Das Gehäuse ist zweiteilig, auf der oberen Hälfte sitzt das Klemmbrett. Die Spulen sind durch Winkelhalter festgelegt. Die Lager liegen in vertikalen Bügeln. Die Kollektorlamellen werden durch rechteckige Ringe ohne Konus zusammengehalten. Pro Zapfen ist je eine Metall- und eine Kohlenbürste verwendet. Der Motor Fig. 45 entspricht $22^1/_2$ PS bei 1000 Touren. In Fig. 44 ist ein solcher Motor unter Zwischenlegung einer Lederkupplung mit einer Centrifugalpumpe verbunden.

Für staubige und feuchte Räume erhält diese Type die Ausführung Fig. 47; die Welle steht hier vertikal, weshalb die Spurlagerschmierung vorgesehen ist. Ein anderer zweipoliger Kapselmotor treibt in Fig. 48 eine



Fig. 38. Gleichstrommotor von Helios.

Schiffswinde an. Die vierpoligen Motoren sind in Fig. 49—51 dargestellt. Der Motor Fig. 49 dient zum Antrieb eines Schiffsventilators. Der Anker hat Ringwicklung in nahezu geschlossenen Nuten, das eine Lager ist mit vier Armen am Gestell befestigt. Der Motor Fig. 51 leistet maximal ca. 70 PS bei 500 Touren (normal ca. 55 PS). Das eine Lagerschild ist angegossen, das andere angeschraubt. Die Polschuhe sind mit Schrauben auf die Pole gesetzt. Die Lagerschalen sitzen cylindrisch im Lagerkörper.[1])

§ 33. Schuckert. Für Leistungen von $^1/_{30}$ bis $^1/_8$ PS zum Antrieb von Nähmaschinen, Ventilatoren, Maschinen der Bijouterieindustrie u. a. baut die E. A. G. vorm.

1) Im Gegensatz zu Fig. 40, wo die Lagerung kugelig ist.





Fig. 39. Vierpoliger Gleichstrommotor von Helios.

Schuckert & Co. die originelle, zweipolige Motortype Fig. 52, deren rotierender Teil als dreifacher Polanker ausgeführt ist. Der Kollektor ist entsprechend nur dreiteilig. Der normale zweipolige Motor ist in Fig 53[1]) in Verbindung mit einem Zahnradvorgelege gezeichnet. Das Gehäuse ist wie bei den meisten übrigen Maschinen der Firma E. A.-G. vorm. Schuckert & Co. Stahlguss; die Polschuhe, deren Kanten schräg zur Achse verlaufen, sind aufgeschraubt. Der Anker trägt glatte Ringwicklung; auch die grossen Maschinen haben fast ausschliess-

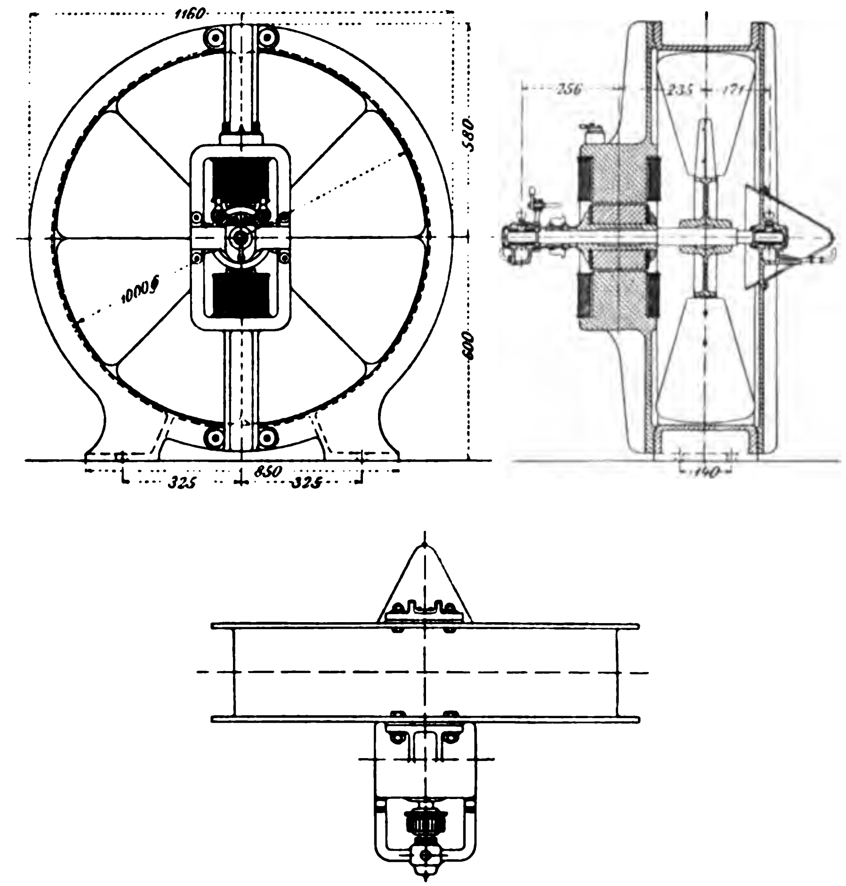


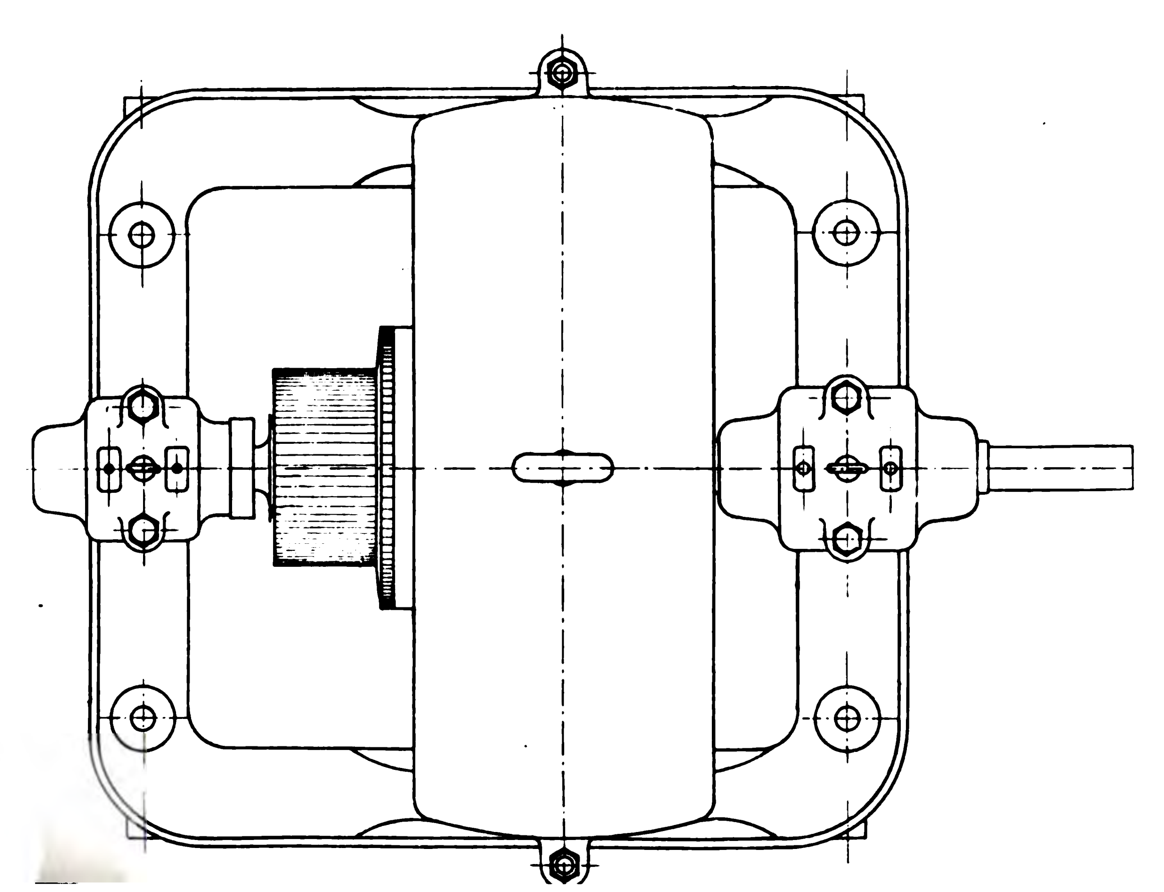

Fig. 41. Ventilatorantrieb von Gebrüder Körting.

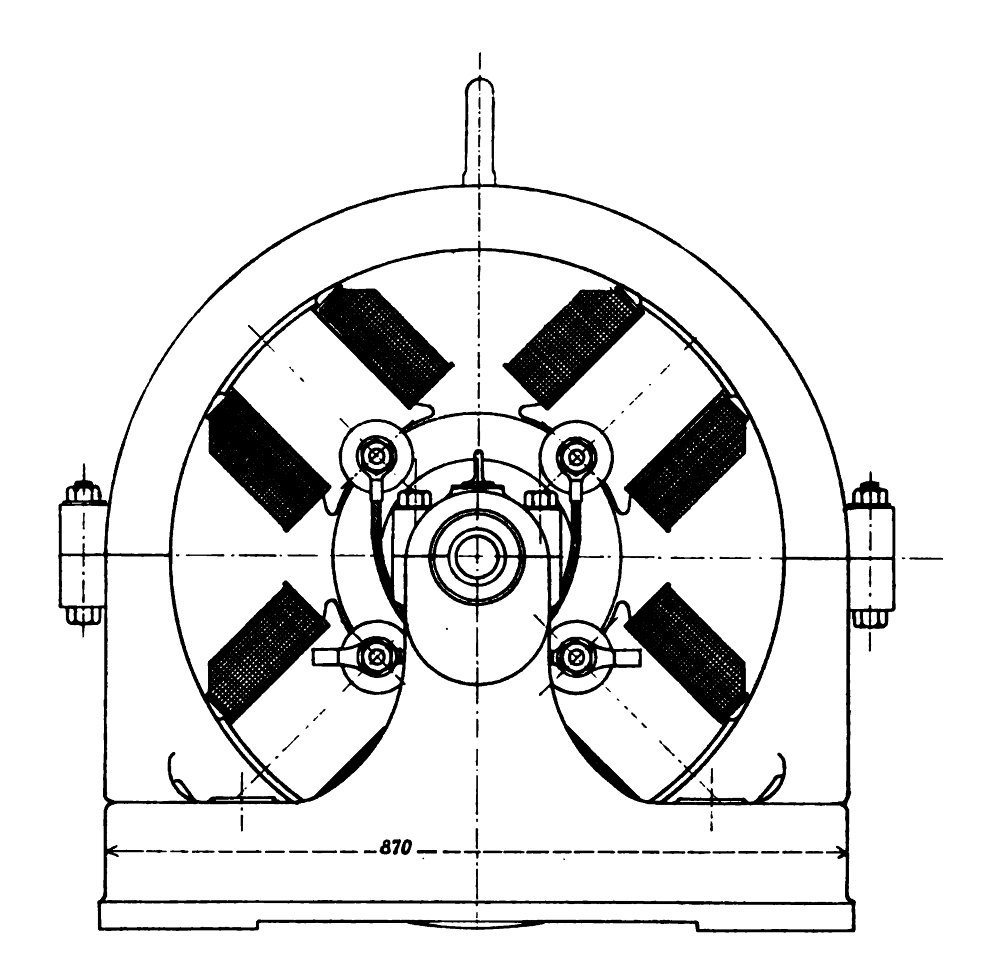
lich glatte Anker, allerdings mit Trommelwicklung. Eine früher vielverbreitete Motortype ist die Manchesterform (Fig. 54), dieselbe fällt aber ziemlich schwer aus und hat grosse Streuung. Von der erwähnten Firma wird die Maschine hauptsächlich für Hochspannung benutzt. Die Isolationen sind durchweg der hohen Spannung entsprechend kräftig gehalten. Die Ankerbleche sind durch isolierte Bolzen zusammengepresst. Das obere Joch ist auf die Magnetschenkel aufgeschraubt. Interessant ist die Spannvorrichtung: Die Spannschrauben sind nur kurz, aber nach Zurücklegung eines gewissen Weges kann der

---

1) Siehe auch Handbuch der Elektrotechnik Bd. IV, Fig. 474, wo der Motor als Erreger im Schnitt gezeichnet ist.

Fi






40.

**Gleichstrommotor der Helios E. A.-G.**

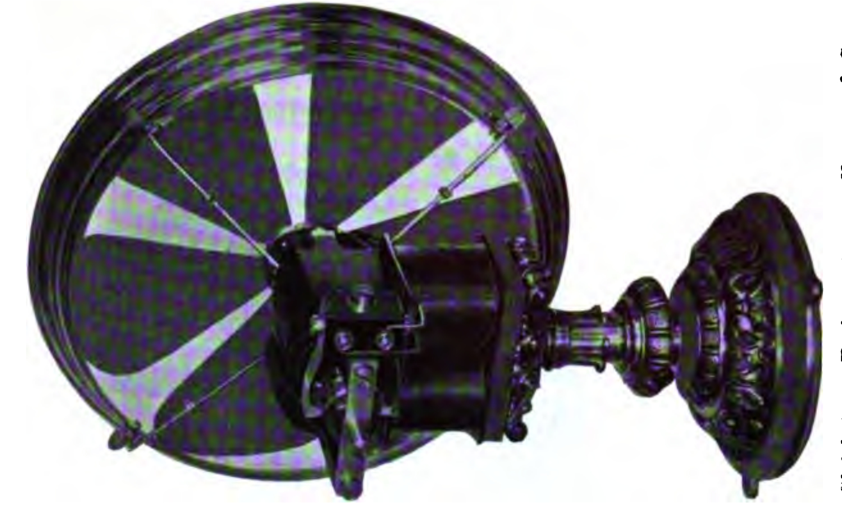
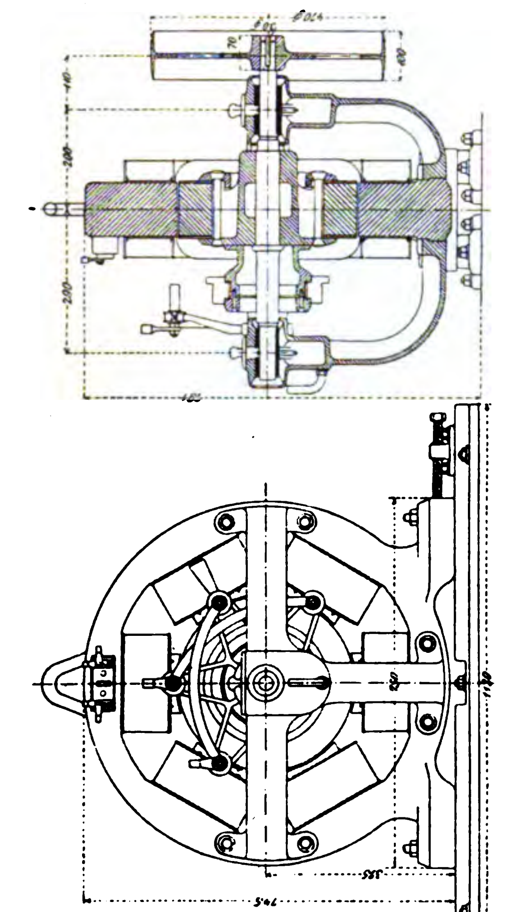


Fig. 43. Gleichstrom-Fächermotor von Kummer & Co.



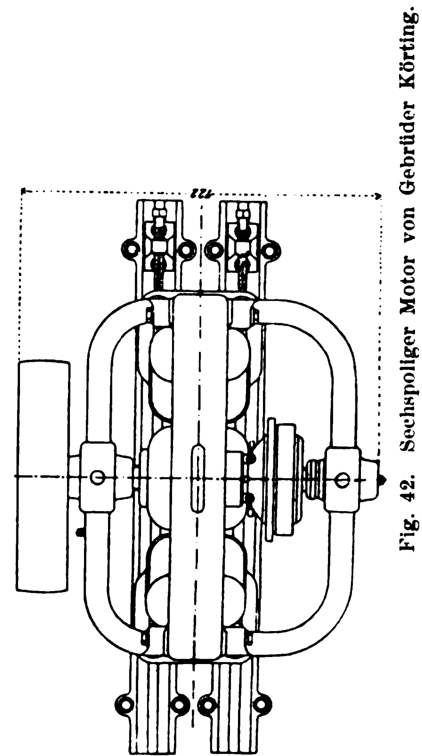


Fig. 42. Sechspoliger Motor von Gebrüder Körting.

Spanner in Kerben vorgesetzt werden. Der vierpolige Motor (Fig. 55 und 56) hat Stab-Trommelwicklung mit Gabelendverbindungen. Auf dem Kollektor schleifen kombinierte Kohlen-Kupferbürsten, die Kohle vor dem Kupfer, was die funkenfreie Zuführung grosser Stromstärken sehr unterstützt. Die un-

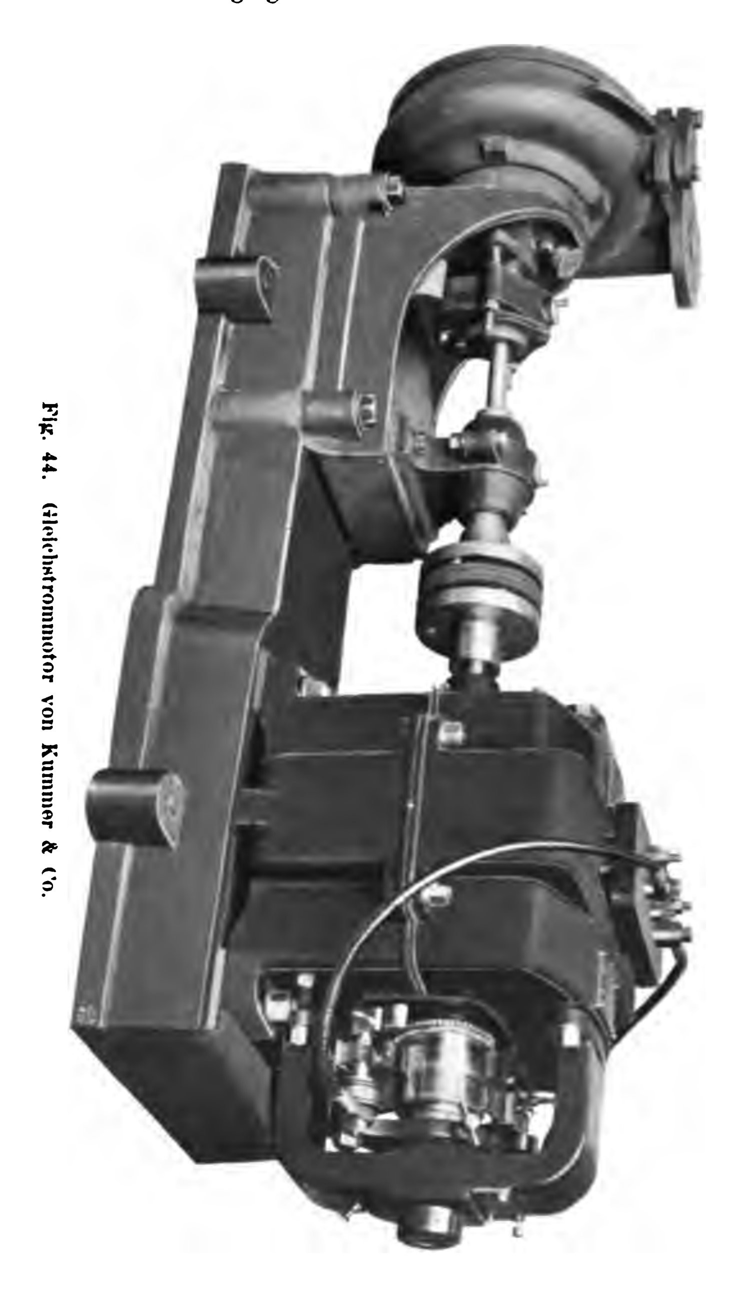


Fig. 44. Gleichstrommotor von Kummer & Co.

geteilten Lagerschalen sind kugelig eingelegt. Die Figg. 57—59 entsprechen Spezialausführungen: Fig. 57 zeigt einen geschlossenen, zweipoligen Kranmotor, Fig. 58 einen vierpoligen Strassenbahnmotor mit Vorgelege und schliesslich Fig. 59 einen achtpoligen Motor für Druckerpressen. Der letztere macht nur 150 Umdrehungen in der Minute, die Leistung ist listenmässig zwischen 0,9

**Zweipoliger Mot**

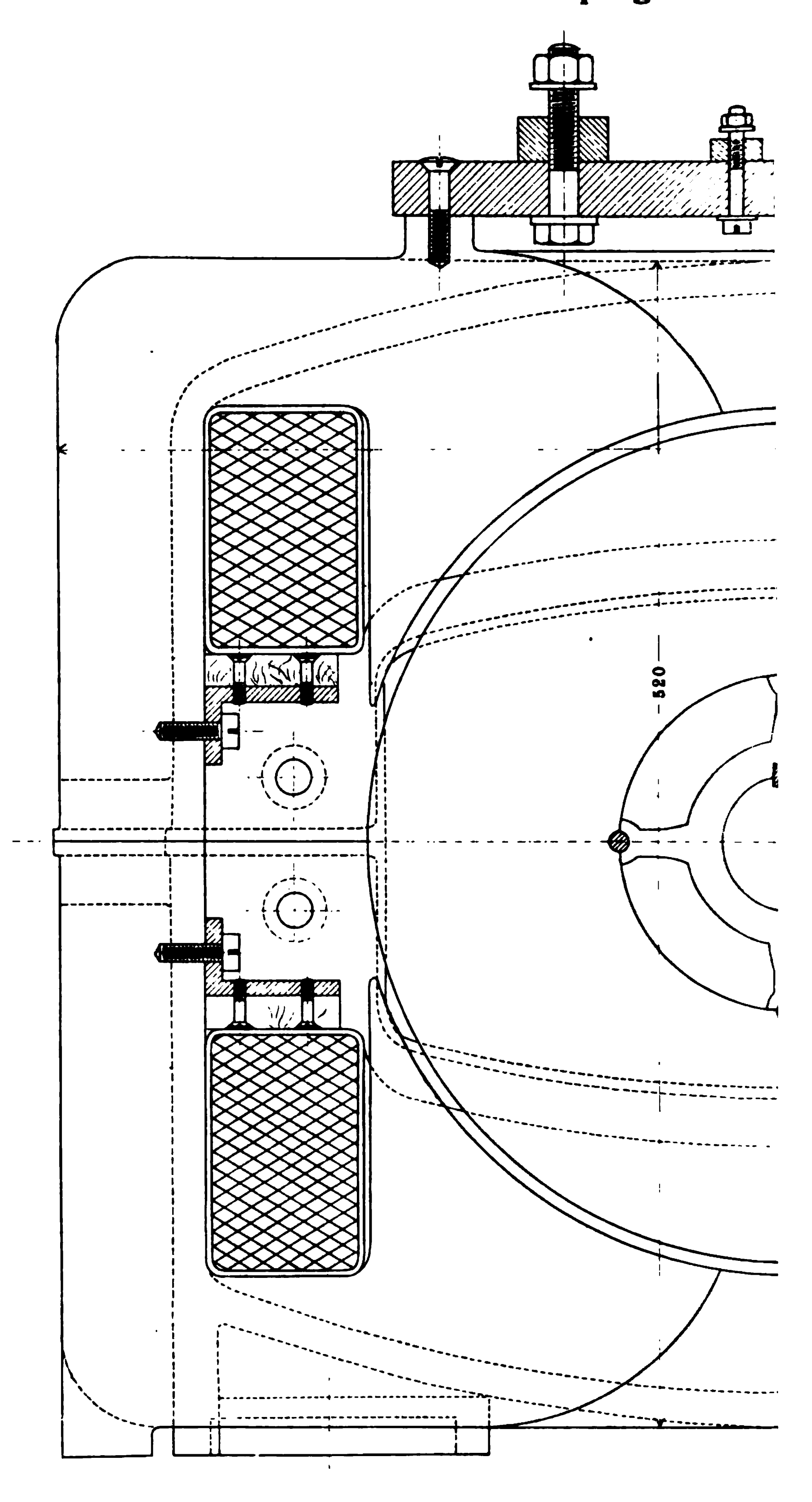
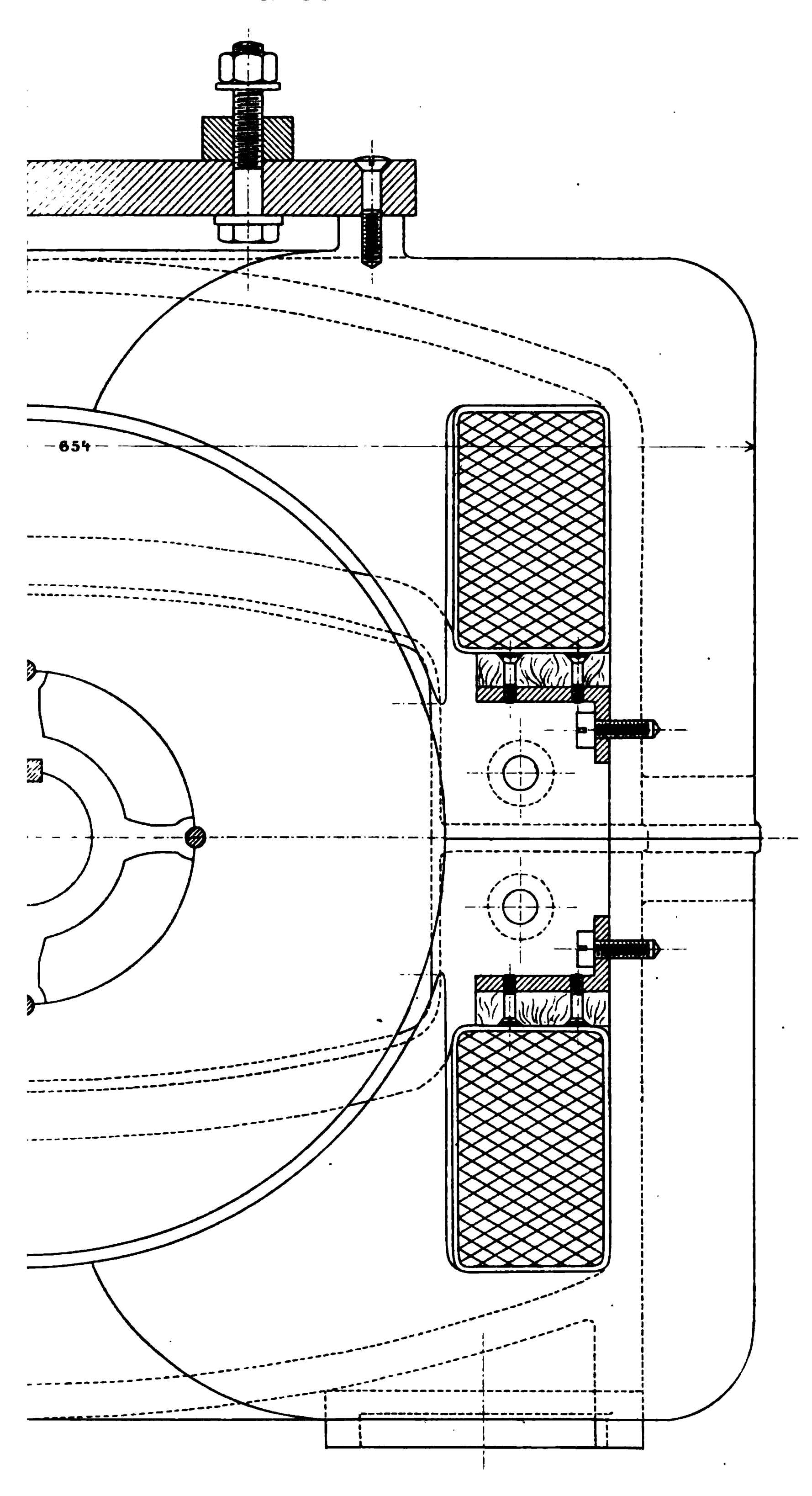



Fig.

von Kummer & Co.




45.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Zweipoliger Motor ·

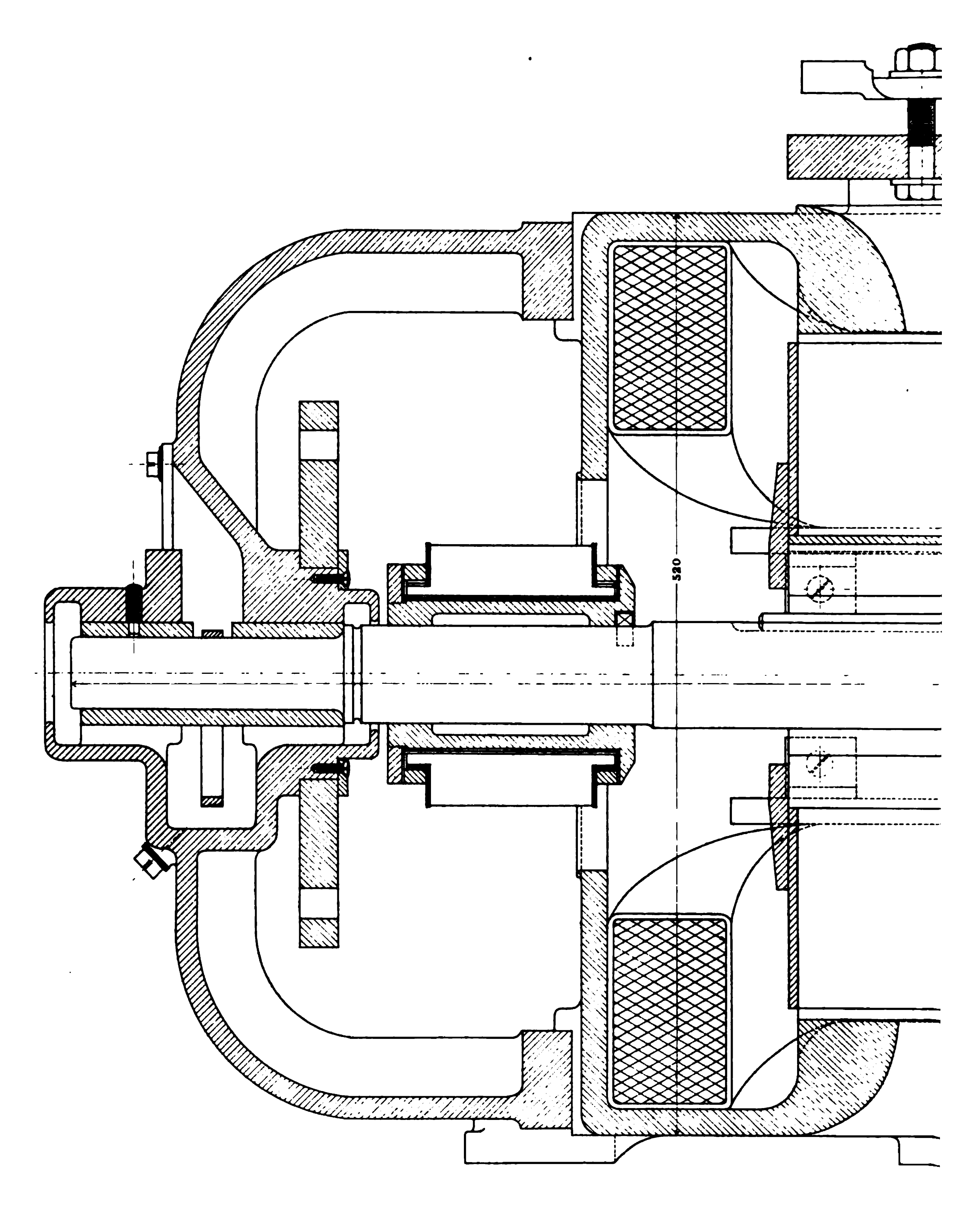
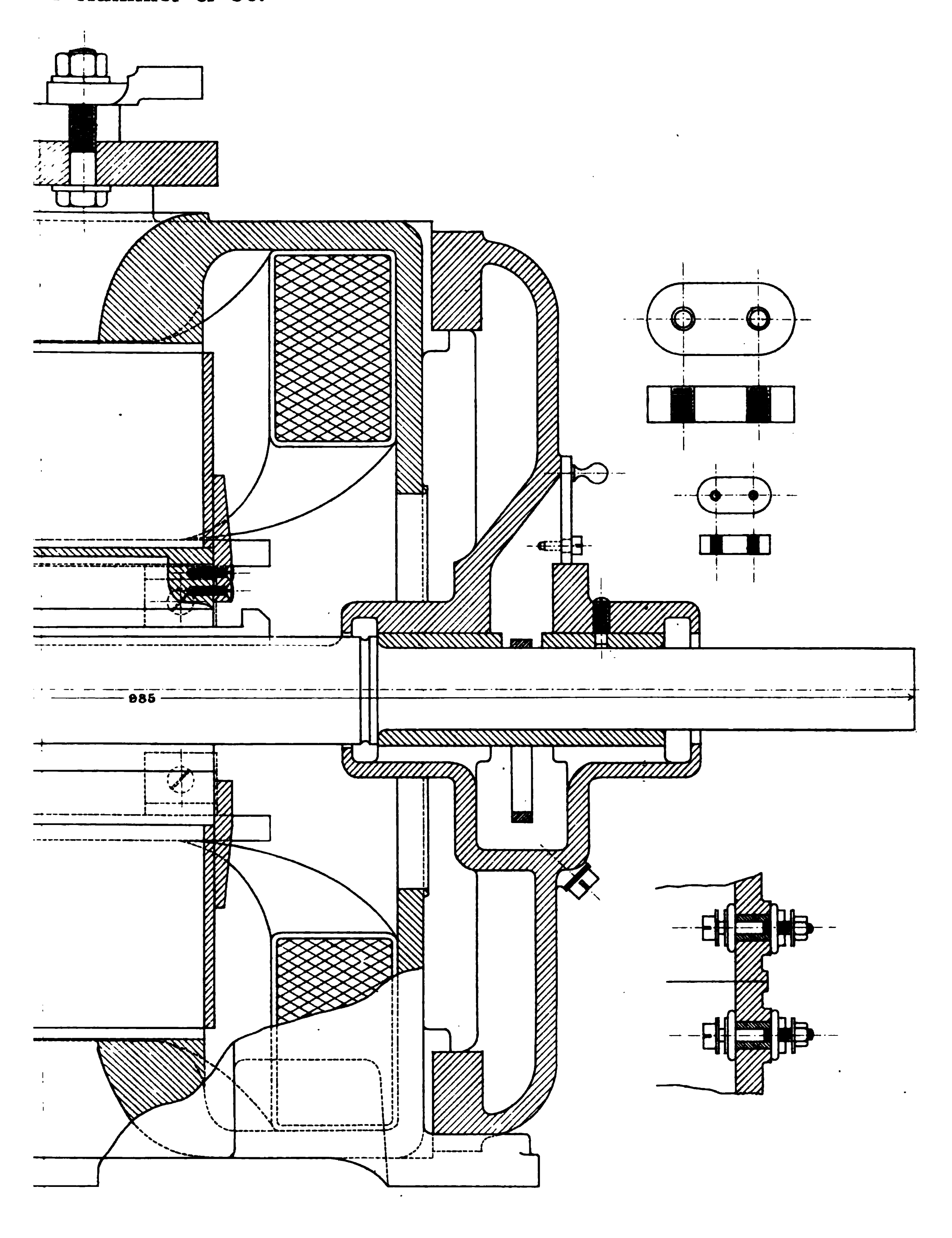



Fig.

ɔn Kummer & Co.




. 46.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

und 41 PS abgestuft. Das Gestell des Motors besteht offenbar aus Gussstahl und hat wohl Polschuhe. Die Serien-Erregerspulen können zur Variation der Ge-



Fig. 47. Geschlossener Motor von Kummer & Co.

schwindigkeit parallel und hintereinander geschaltet werden. Für die Steuerung ist ein besonderer Kontroller vorgesehen. Der Motor ist äusserst gedrängt und schmal gebaut, so dass er sich der anzutreibenden Maschine elegant anschmiegt.



Fig. 48. Winde mit geschlossenem Motor von Kummer & Co.

§ 34. Schwartzkopff.

Die Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vormals L. Schwartzkopff liefert als Spezialität Motoren mit zwei Ankerwicklungen zur Veränderung der Umlaufszahl in weiten Grenzen. Eine zweipolige und eine vierpolige Ausführung ist in Fig. 60 und 61 abgebildet. Der Lagerbock ist in Fig. 60 auf eine cylindrische Fläche geschraubt.

§ 35. Siemens & Halske.

Feldgestell, Grundplatte und Lagerböcke der zweipoligen Motoren der Siemens & Halske A.-G. (Fig. 62) sind aus einem Stück in Gusseisen hergestellt. Die Lager selbst sind in cylindrischen Flächen auf die Böcke aufgesetzt. Die Anker tragen Schablonenwicklung. Die Anschlussklemmen sitzen als isolierte Bolzen am Gehäuse. Für kleine Leistungen wird die Type Fig. 63 gebaut, wobei auch das Feld aus gestanzten Blechen zusammen-



Fig. 49. Vierpoliger Gleichstrommotor von Kummer & Co.

gesetzt ist. Der hufeisenförmige Motor Fig. 64 ist von der Firma in grosser Zahl für die verschiedensten elektrischen Antriebe hergestellt worden. Joch, Magnetkerne und Polschuhe bestehen aus Gusseisen. Bei einem derartigen Motor[1]) für circa 4 PS hat der Anker 40 Nuten 7 mm breit und 14,4 mm tief bei einem Luftspalt von 3 mm einseitig. Ankerdurchmesser und -länge betragen je 185 mm. Der Kollektor setzt sich aus 20, leicht einzeln ersetzbaren Lamellen zusammen. Der Anker ist an beiden Enden durch Zinkschutzkappen abgedeckt. Die Induktion im Anker beträgt circa 10000, in den Zähnen circa 19000 und im Joch circa 7000. Sechs Motoren von der Anordnung Fig. 65 betreiben die elektrischen Züge der Wannseebahn.[2])

1) Siehe Kapp, Elektromechanische Konstruktionen.
2) Z. V. D. J. 1900, p. 1202.

## Vierpoliger Moto[r]

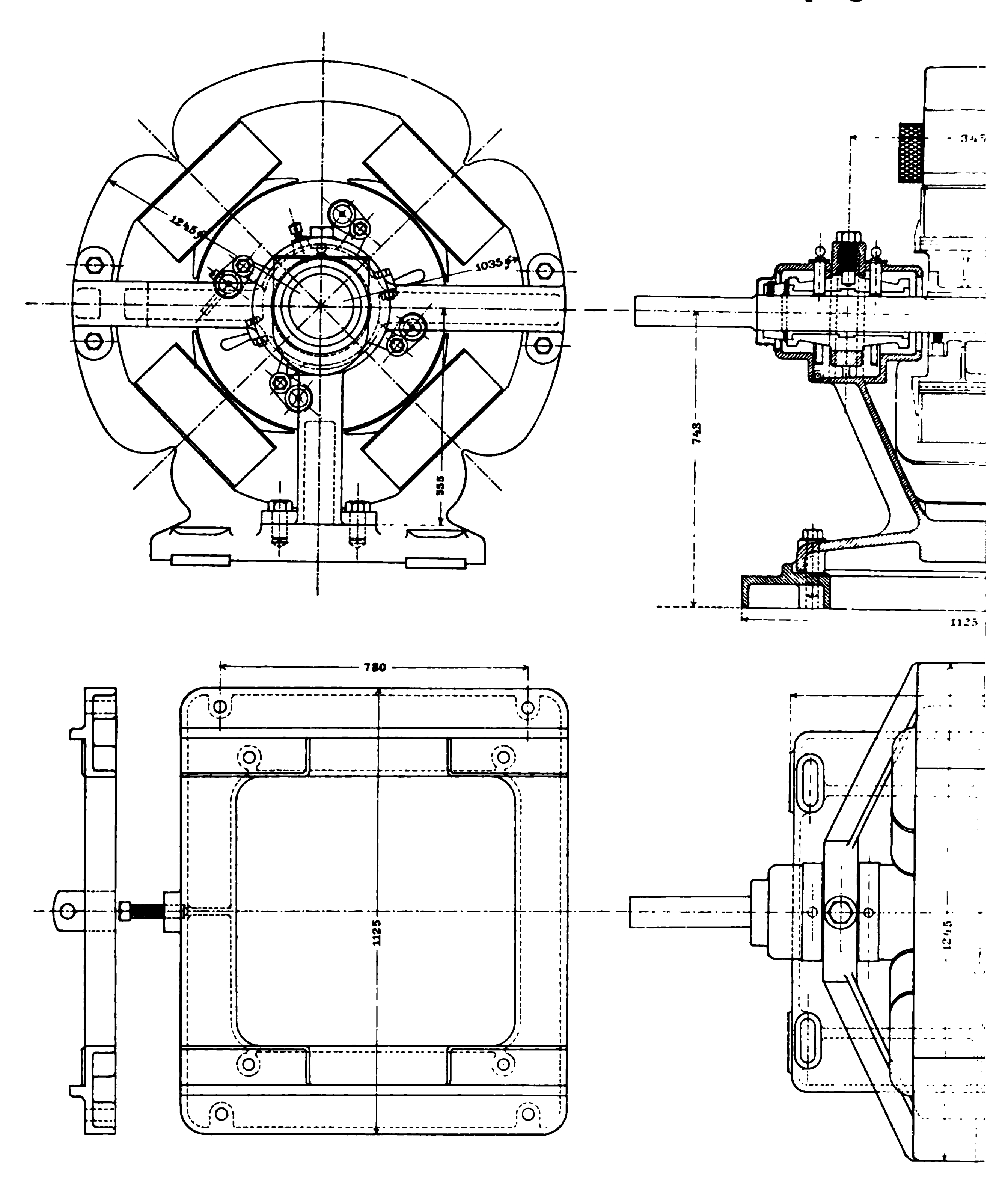
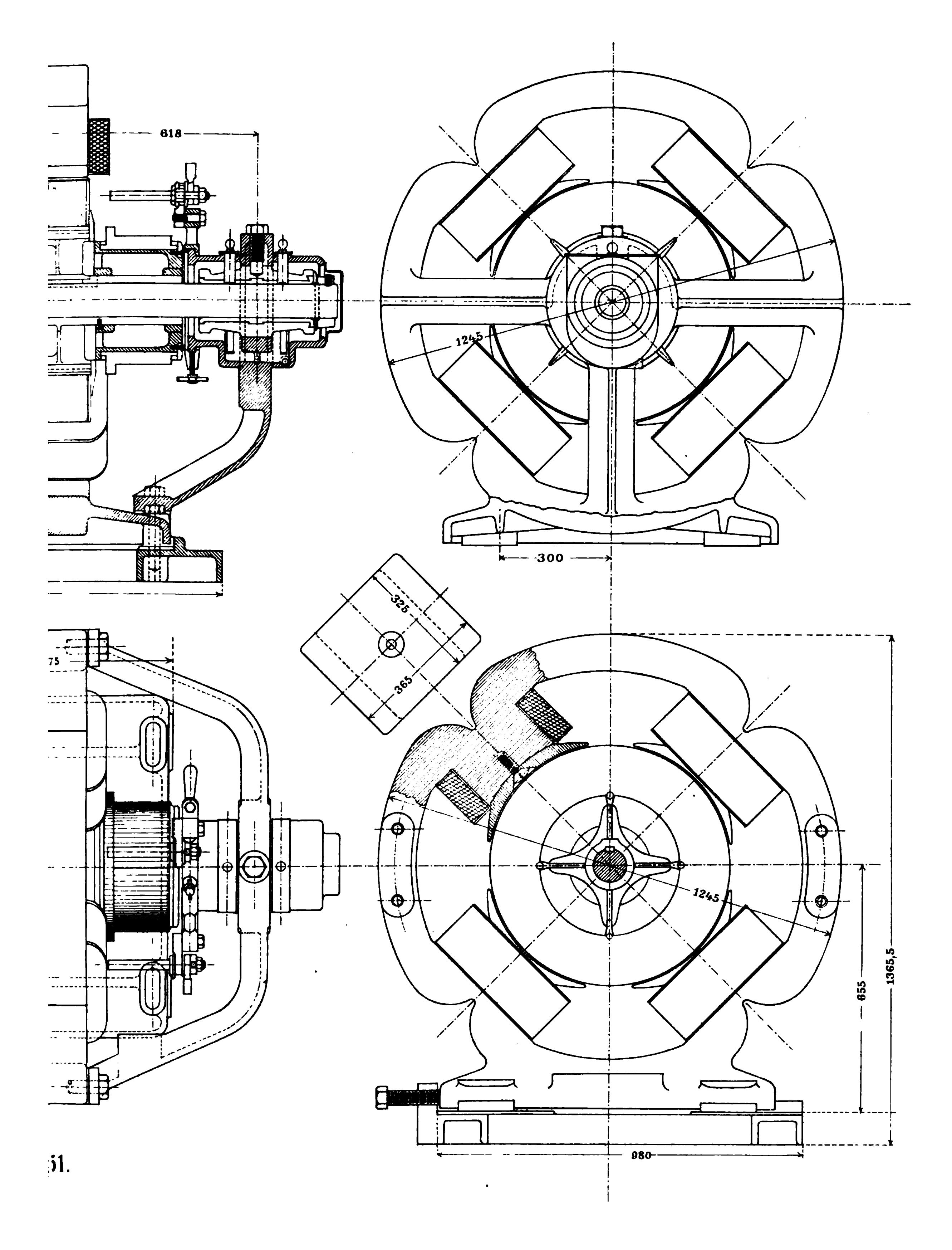



Fig.

**›n Kummer & Co.**




›1.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

Die Dauerleistung pro Motor beträgt 70 PS bei 260 Touren. Die Erregung liegt im Hauptstrom, der Anker ist unmittelbar auf die Achse gekeilt.

Die Union E.-G. spielt im Anschluss an die Gen. Electric Co Schenectady im Strassenbahnwesen seit einer Reihe von Jahren eine führende Rolle. Der Strassenbahnmotor G. E. 800 (Fig. 66) hat seine Bezeichnung daher, dass er eine Zugkraft von 800 pounds an einem Rad von 30″ Durchmesser entwickelt. Er leistet ca. 22 PS bei 525 Touren. Aus der Zeichnung ist die

§ 86. Union.

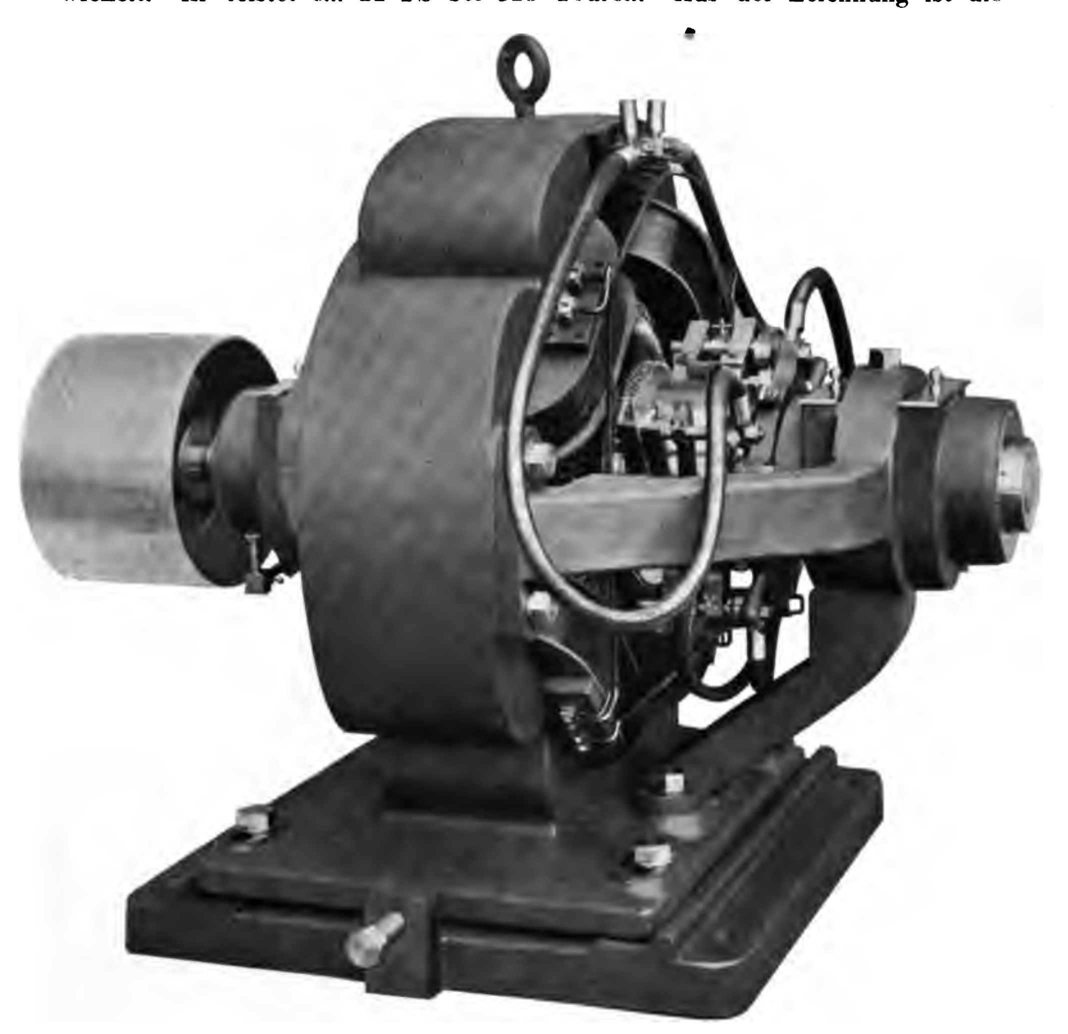


Fig. 50. Vierpoliger Gleichstrommotor von Kummer & Co.

Konstruktion der Lager mit konsistenter Schmierung, die Kollektorklappe, die Spulen mit Spulenhalter, die Schablonen-Ankerwicklung und die Befestigung des Trieblings zu ersehen. Neuerdings (Fig. 67) werden alle vier Pole mit Spulen bewickelt, in der Skizze sind zwei Folgepole vorgesehen. Die Polschuhe werden geblättert, da die Nutenzahl auf ein Drittel der Lamellenzahl reduziert ist. Eine andere Spezialität der Union E.-G. ist der Bau geschlossener Motoren (Fig. 68—70) für Hebemaschinen und Bergwerksbetriebe. Diese Typen werden häufig mit angebauter Zahnradübersetzung

von 1 : 4 bis 1 : 5 in einem Schutzkasten versehen. Der Motor Fig. 68 leistet bei 168 Touren $2^1/_2$ PS, Fig. 69 und 70 bei 187 Touren 12 PS. Das kleinere Modell hat Lagerschilder, das grössere ist zweiteilig ausgeführt. Man beachte die einfache, leicht ersetzbare Bürstenhalterkonstruktion Fig. 69. Die



Fig. 52. Kleinmotor von Schuckert & Co.

normale, vierpolige Motortype zeigt Fig. 71 und 72. Die skizzierte Maschine leistet bei 700 Touren 17 PS, sie ist beiderseits durch luftige Lagerschilder abgeschlossen. Die geblätterten Polschuhe sind auf die Stahlpole

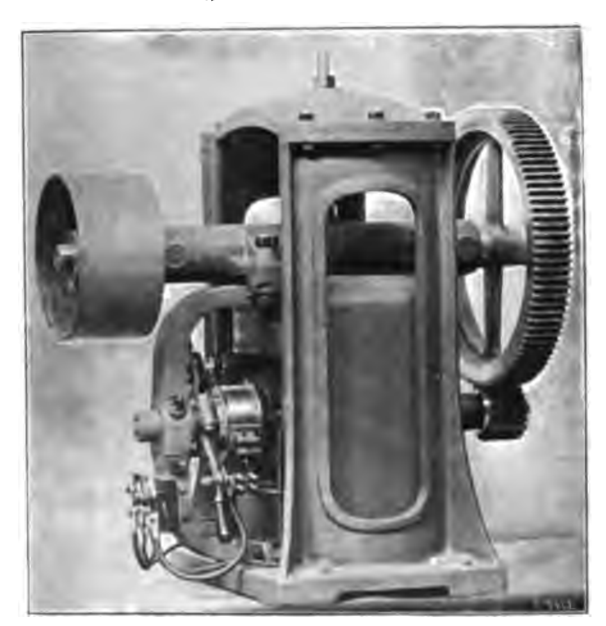


Fig. 53. Zweipoliger Motor mit Zahnradvorlage von Schuckert & Co.

geschraubt. Die Erregerspulen werden ohne Spulenkästen ausgeführt. Der Anker hat drei Ventilationskanäle und Schablonenwicklung.

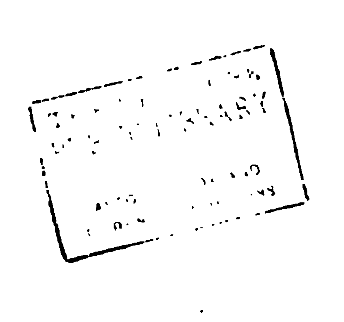
§ 37. Ganz & Co. Ein Polschuh Patent KANDÒ (GANZ & Co.) hat die Form Fig. 73. Die Polschuhkanten laufen in zahlreiche Spitzen aus, überdies wird der Luftspalt

## Zweipoliger Motor von Schuckert & Co.

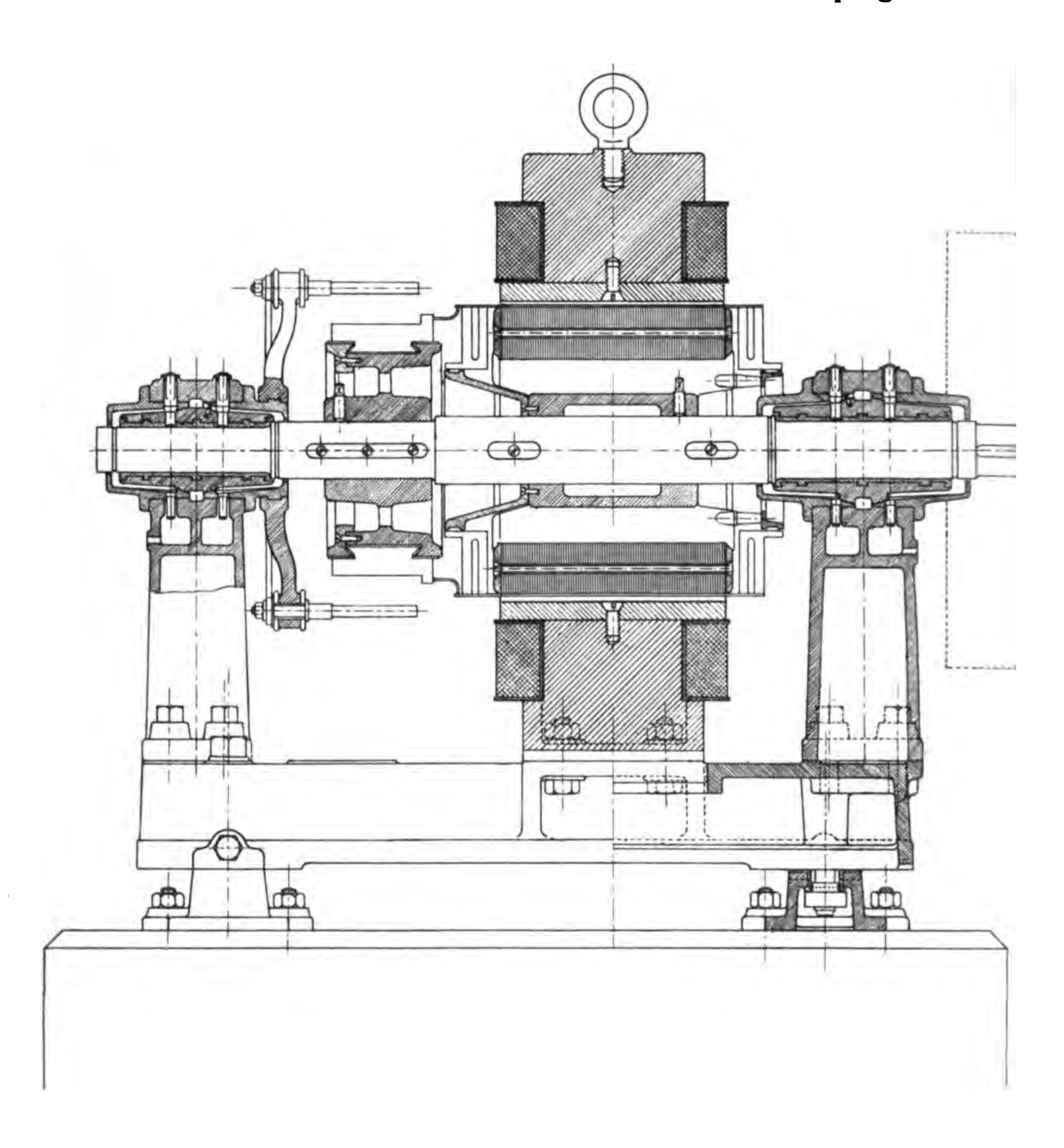
Fig. 54.



*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*



## Vierpoliger Motor



**on Schuckert & Co.**

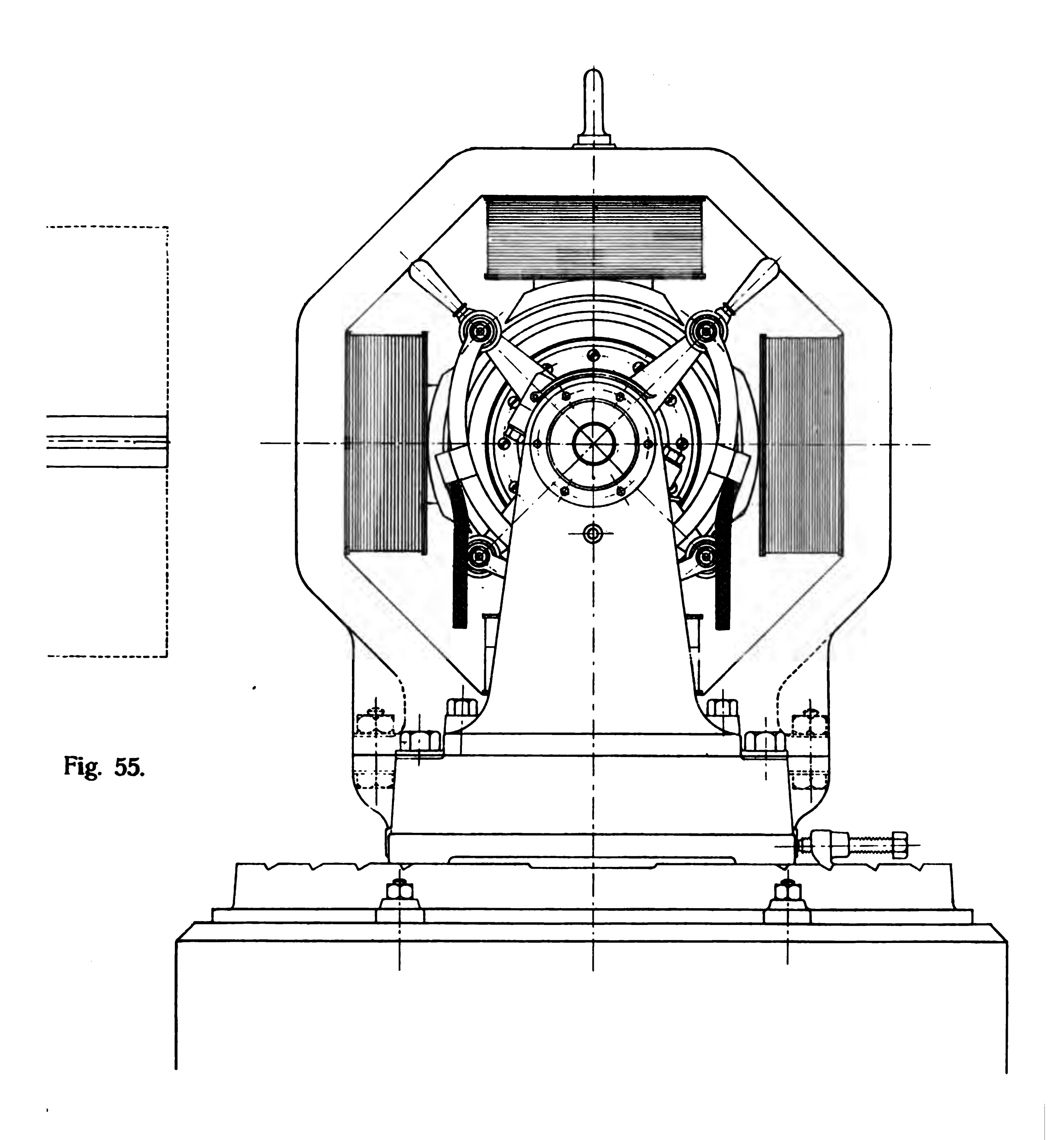
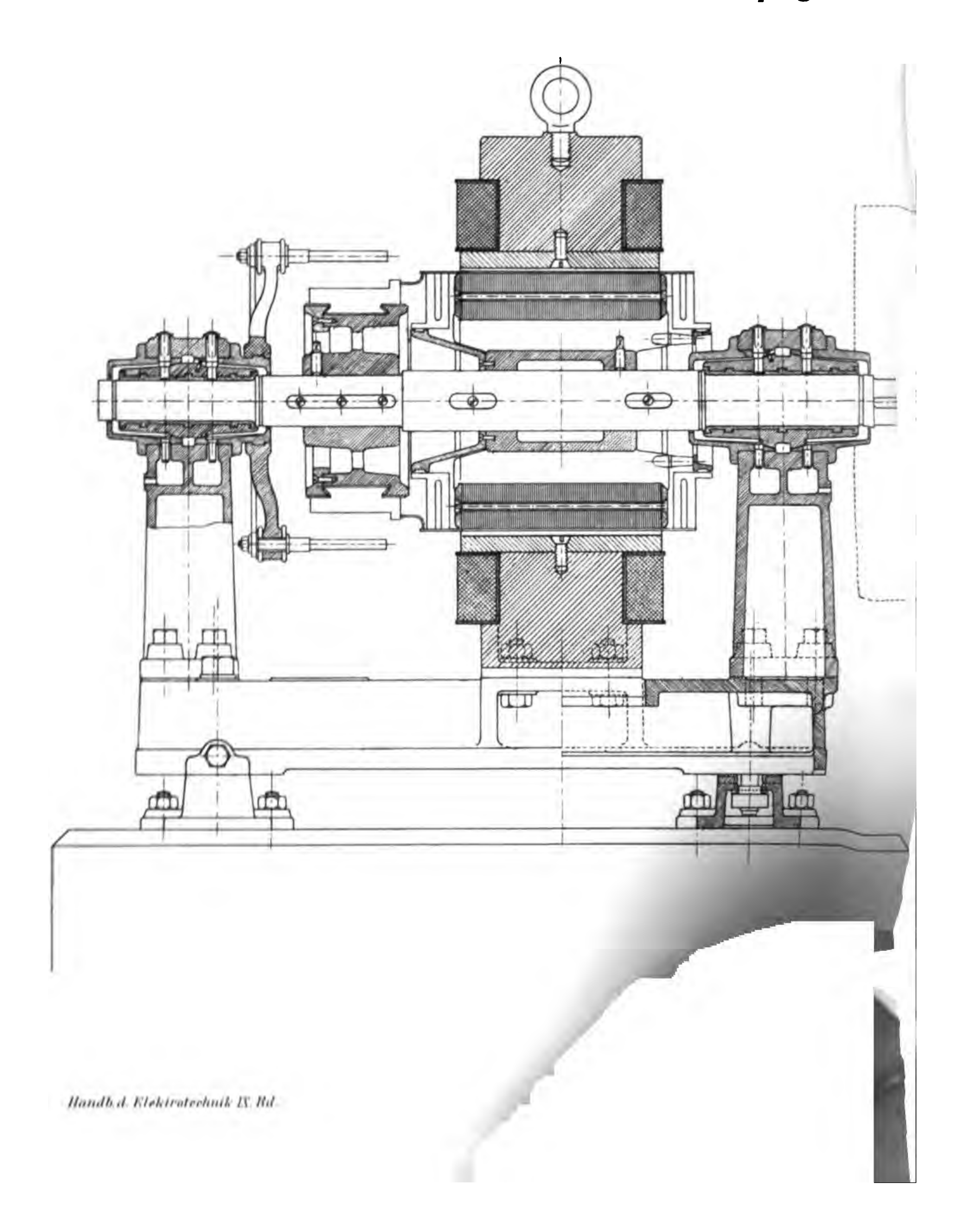


Fig. 55.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

## Vierpoliger Motor



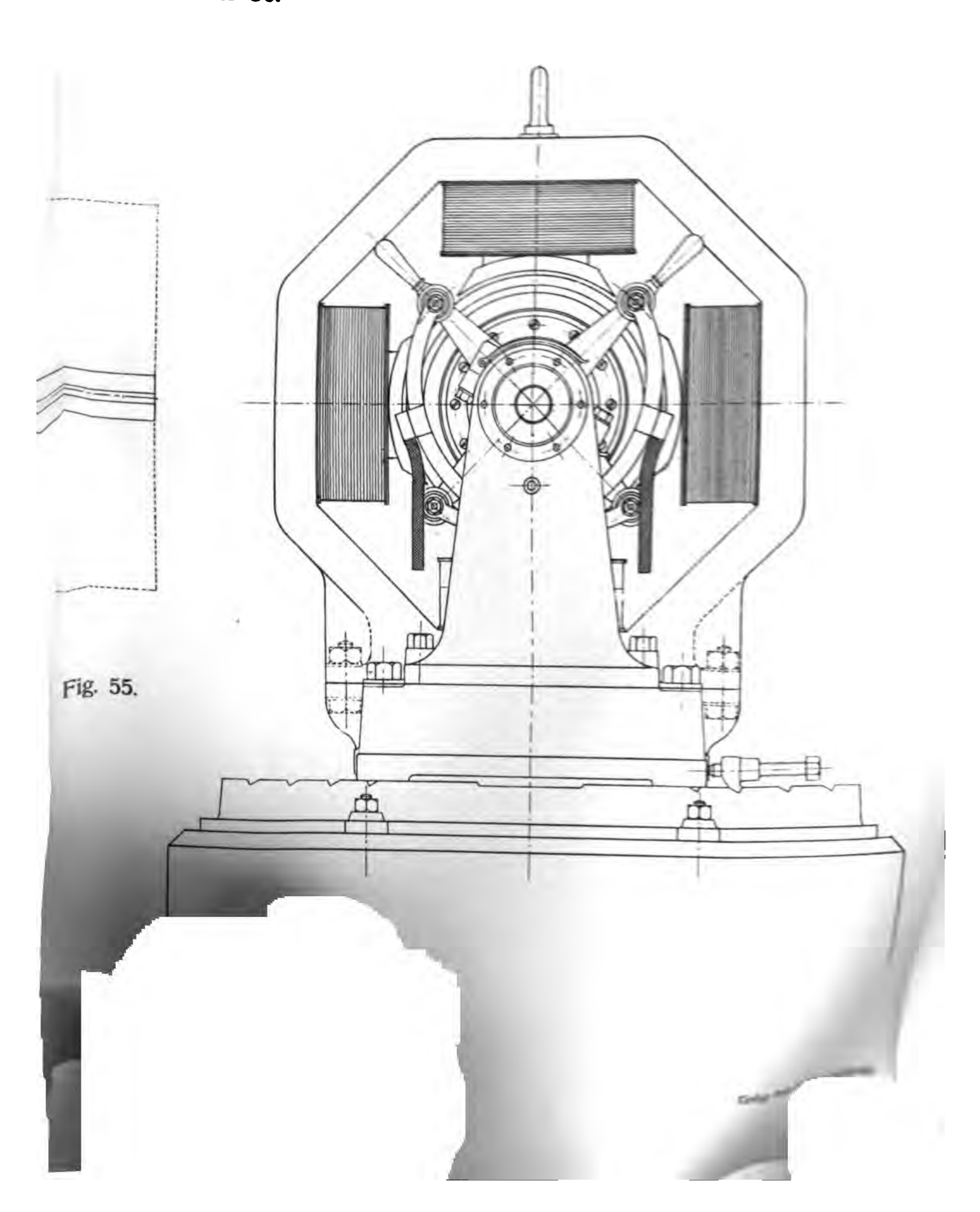
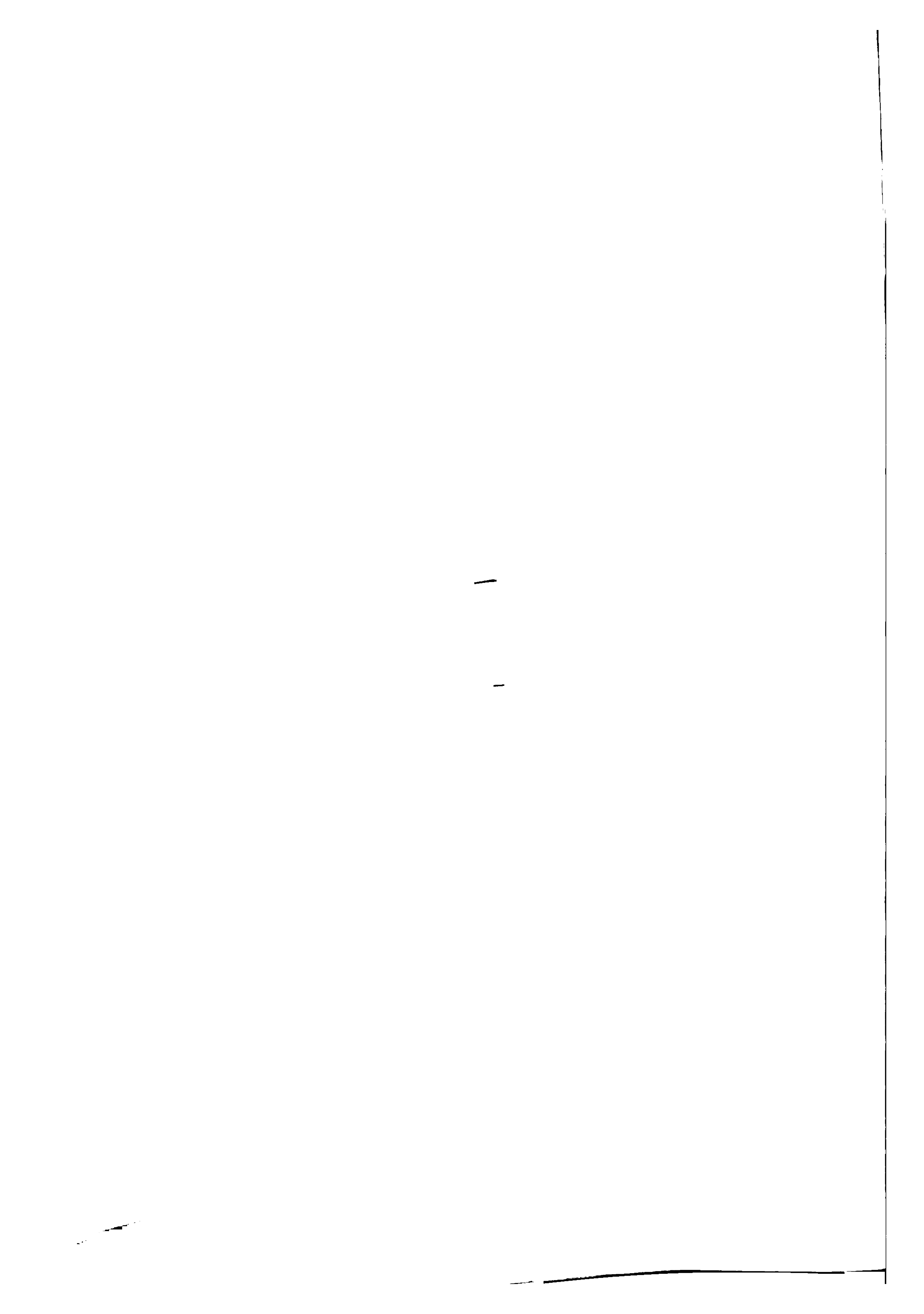


Fig. 55.



an den Kanten grösser, so dass aus beiden Gründen das Feld allmählich abflacht, was die Kommutierung begünstigt. — Der Vollbahn-Gleichstrommotor

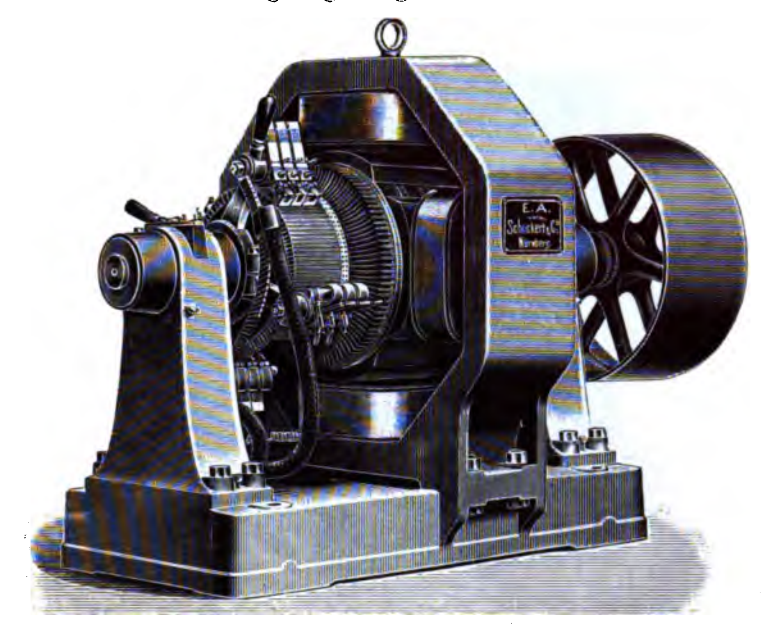


Fig. 56. Vierpoliger Motor von Schuckert & Co.

(Fig. 73a—d) von Ganz & Co. ist bei 800 Minuten-Umdrehungen und 500 Volt Betriebsspannung für 50 PS Dauerleistung bemessen. Die vierpolige Serien-

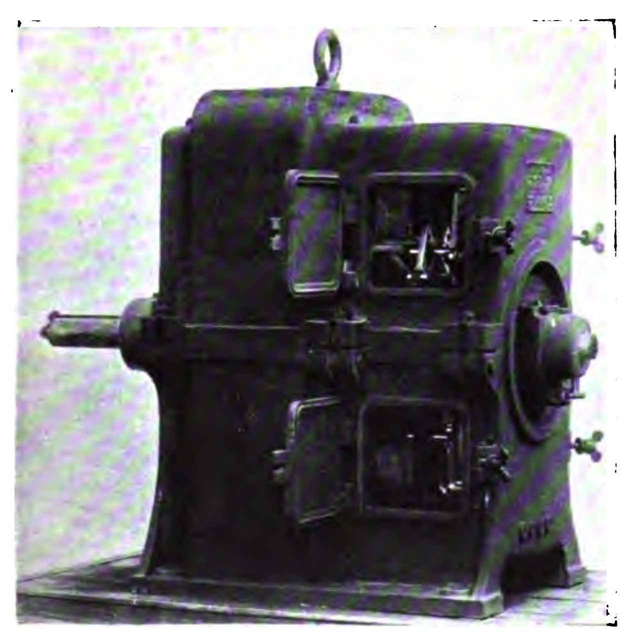


Fig. 57. Kranmotor von Schuckert & Co.

Trommelwicklung liegt in 49 Nuten; pro Nute sind sechs ovale Drähte von $3 \times 7{,}5$ mm vorgesehen. Der Kollektor hat $3 \times 49 = 147$ Lamellen. Die

vier Magnetspulen zu je 63 Windungen aus zwei parallelen Drähten von 5 mm Durchmesser sind in Serie geschaltet. Dieser Motor hat bei der Probe-



Fig. 58. Strassenbahnmotor von Schuckert & Co.

bremsung zeitweilig Stromstösse bis 600 Ampère aufgenommen, ohne dass sich eine wesentliche Funkenbildung gezeigt hätte. Derselbe ist im regulären

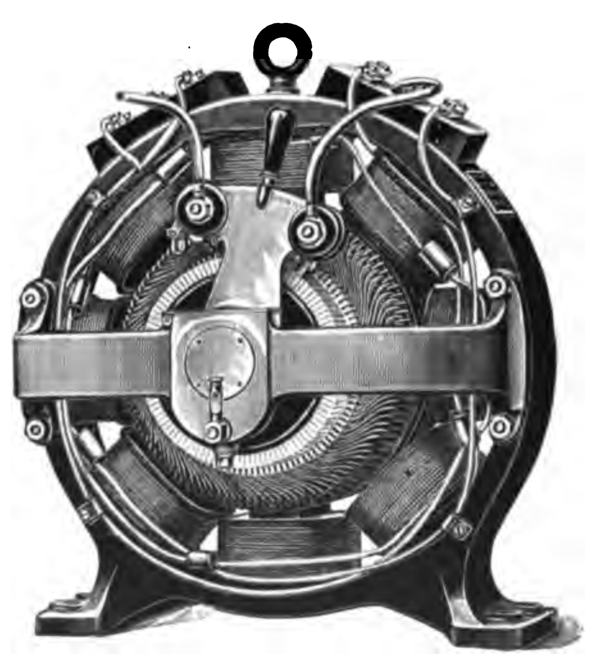


Fig. 59. Druckerpressenmotor von Schuckert & Co.

Betrieb einigemale mit 100 KW Energieaufnahme ohne bedenkliche Erwärmung gelaufen. Der Anker ist mit einer Reihe Ventilationskanäle ver-

sehen. Der Kollektor ist durch eine Klappe leicht zugänglich gemacht. Die Bürstenhalter sind am Gestell befestigt, die Kohlen können bequem ersetzt werden. Die Lager haben Fettschmierung. Die Zahnradübersetzung

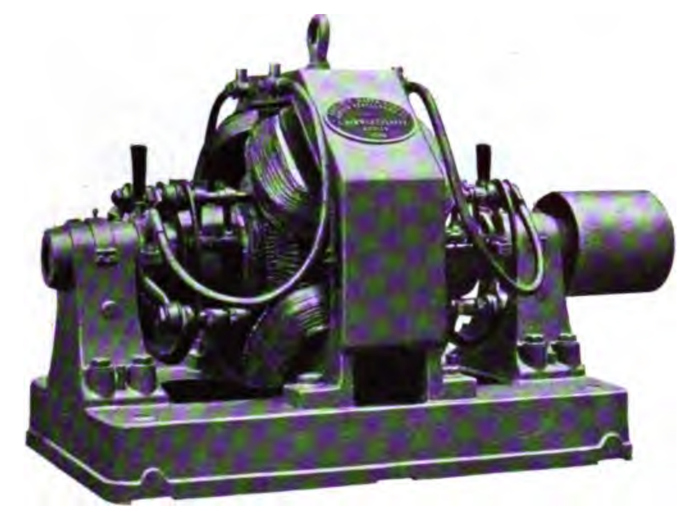


Fig. 61. Doppelkollektormotor von Schwartzkopff.

auf die Radachse beträgt 1 : 3. Das grosse Zahnrad ist längs der Arme geteilt.

§ 38. Kolben & Co.

Das Bild (Fig. 74) veranschaulicht eine Gruppe von Gleichstrommotoren der E. A. G. vorm. KOLBEN & Co. Der kleinste, zweipolige leistet 5 PS,

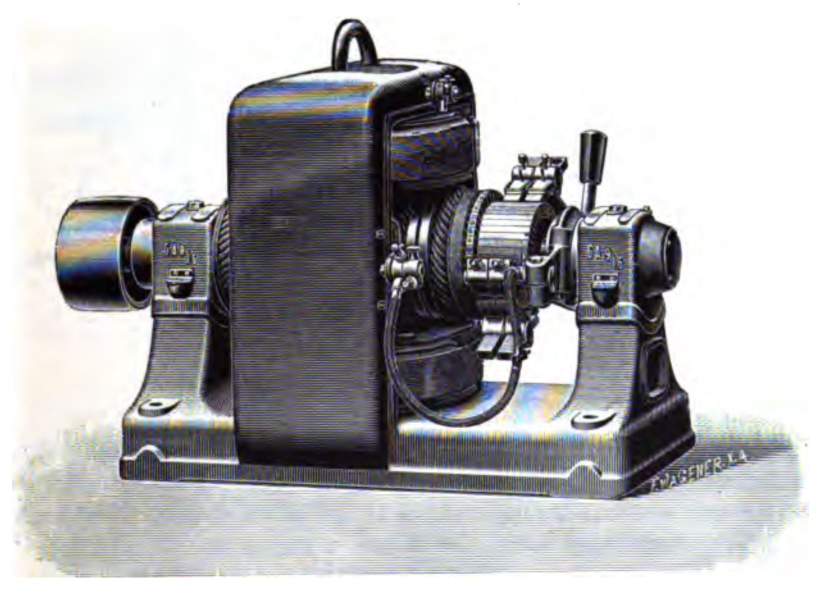


Fig. 62. Gleichstrommotor von Siemens & Halske.

der grösste 30 PS. Die kleineren Typen besitzen Bügellager, die grösseren Grundplatte mit angegossenem Lager von recht gefälliger, stabiler Form. Das Stahlgussgestell ist im letzteren Falle auf die Grundplatte aufgeschraubt



Fig. 67. Strassenbahnmotor der Union E.-G.

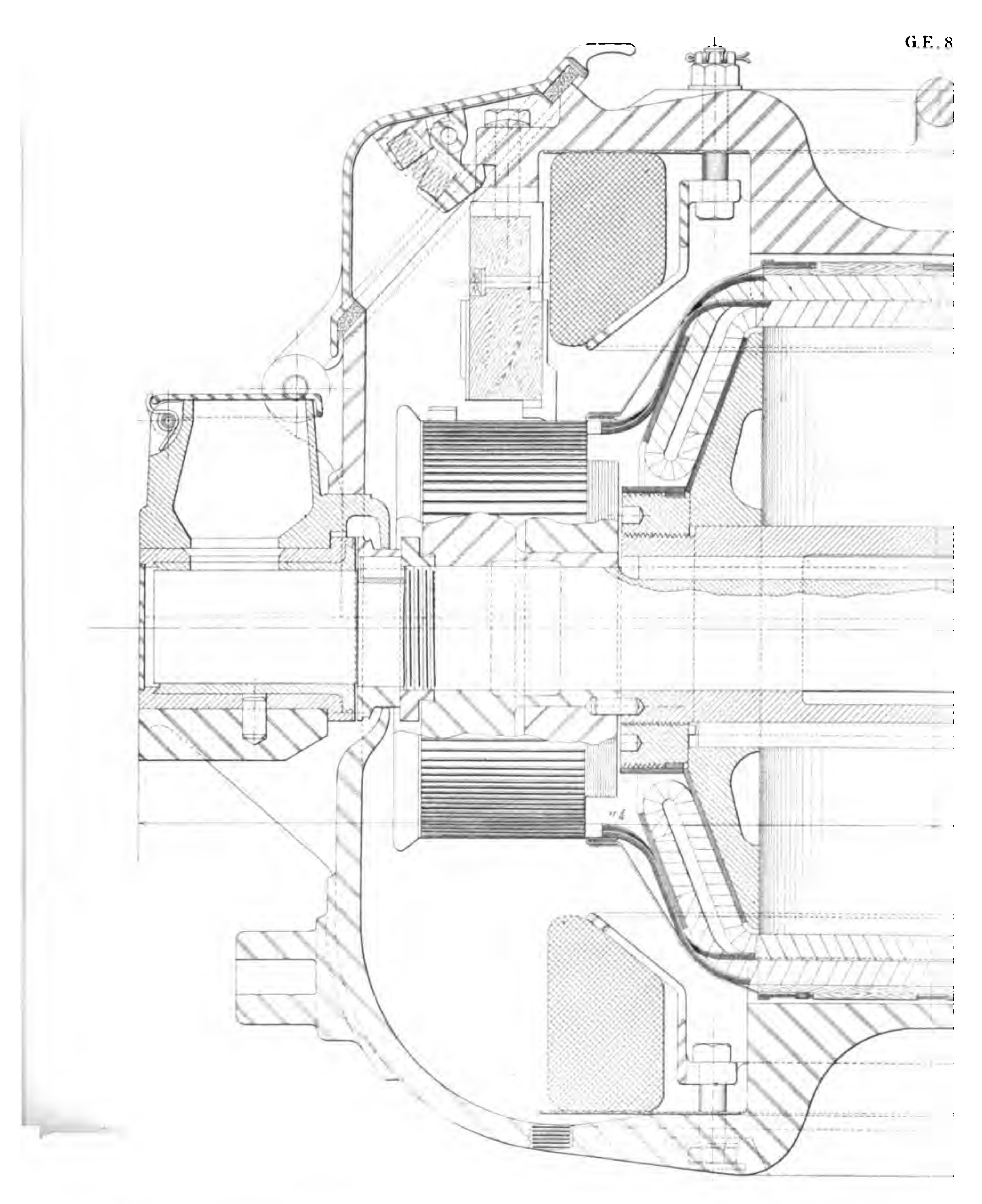
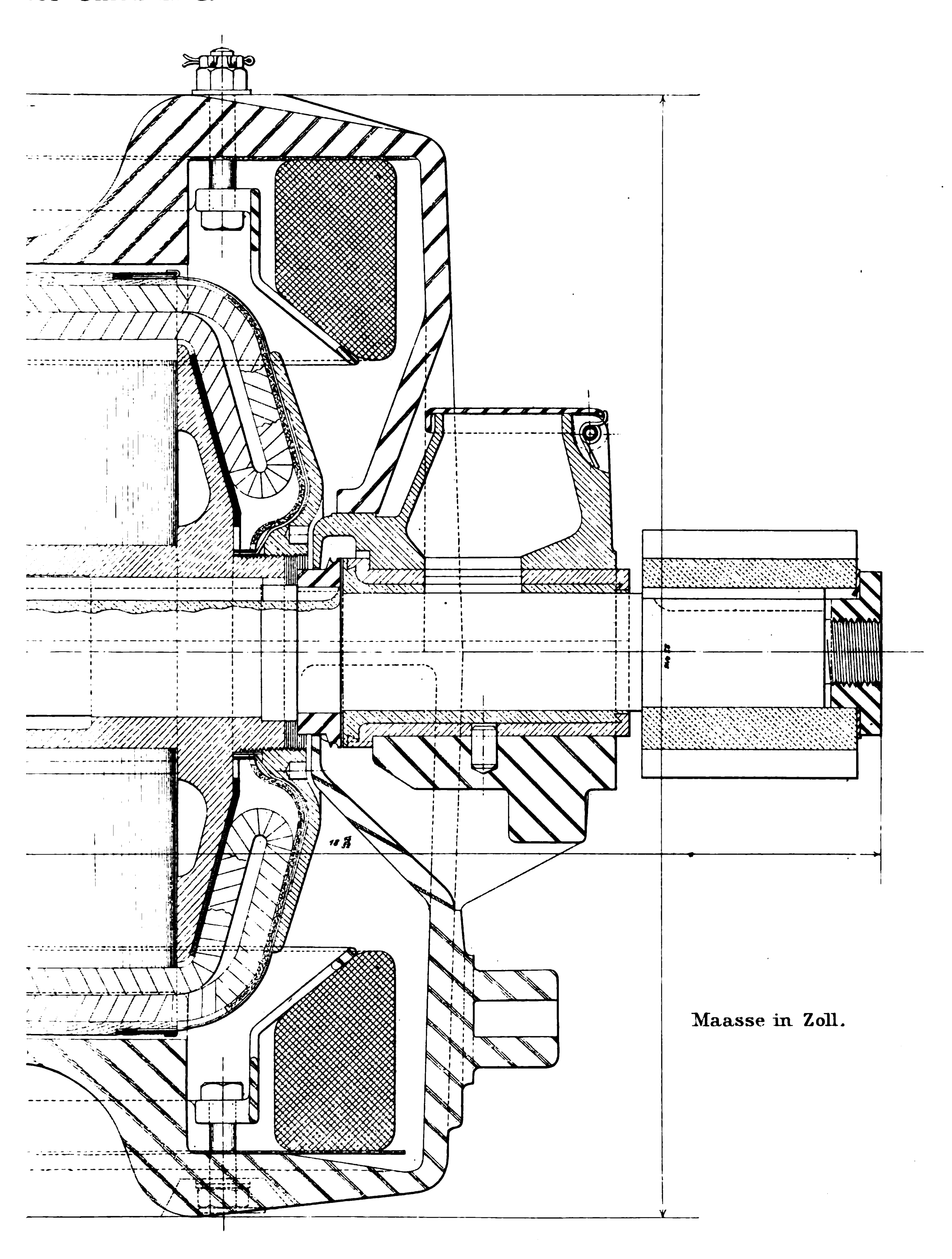
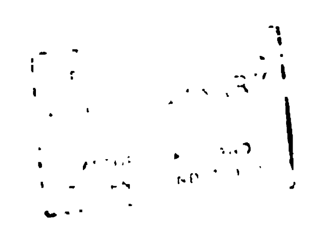



Fig. 66

**ler Union E. G.**




*Verlag von S*



§ 41. Oerlikon.

Die Gleichstrommotoren der Maschinenfabrik **Oerlikon** (Fig. 79 und 80 für 9—12 PS und 800 Touren) für den Betrieb von Hebezeugen und für direkte Kuppelung mit Werkzeugmaschinen besitzen ein vierpoliges kastenförmiges Stahlgussgestell mit angegossenen Polen. Zwei Pole tragen die Spulen. Für die Anker ist Ringwicklung gewählt worden, um für Reparaturen die grösstmögliche Zugänglichkeit zu schaffen.

Die grösseren Motoren, die mit den entsprechenden Dynamos identisch sind, zeigen die Konstruktionen Fig. 81 und 82: Stahlgussgestelle mit aufgeschraubten cylindrischen Polkernen. Bis circa 100 PS besteht die Ankerwicklung aus Drahtspulen, die auf Schablonen gewickelt werden (Fig. 83), für grössere Anker besteht jede Windung aus einem einzigen Drahtstück. Die vierpolige Maschine (Fig. 81 und 82) leistet bei 370 Touren und 500 Volt ca. 300 PS; die achtpolige Compoundmaschine (Fig. 83a) bei 300 Touren, 125 Volt ca. 250 PS. Die Serienwicklung besteht aus Flachkupfer.

Fig. 68. Geschlossener Motor der Union E.-G.

§ 42. J. J. Rieter & Co.

Der Strassenbahnmotor der A.-G. vorm. J. J. **Rieter** & Co., Winterthur (Fig. 84) hat zwei bewickelte Pole und zwei Folgepole, die in der Mitte geteilt sind. Die Polschuhe sind in der Achsrichtung durch einen Bogen begrenzt. Die Ankerwicklung liegt in nahezu geschlossenen Nuten. Das in einem gusseisernen Schutzkasten[1]) laufende Zahnrad ist längs zweier Arme geteilt.

§ 43. Farcot. Gramme.

Das zweipolige Modell (Fig. 85) von Farcot-St.-Ouen[2]) (**Fischer-Hinnens** Konstruktion) ist sehr gedrängt aufgebaut. Es ist nur eine Erregerspule angewandt; die dadurch bedingte Unsymmetrie im Felde wird durch entsprechende Wahl des Bürstenabstandes aufgehoben.

1) Neuerdings werden die Kästen von verschiedenen Firmen gepresst.
2) **Fischer-Hinnen**, Die Gleichstrommaschinen.

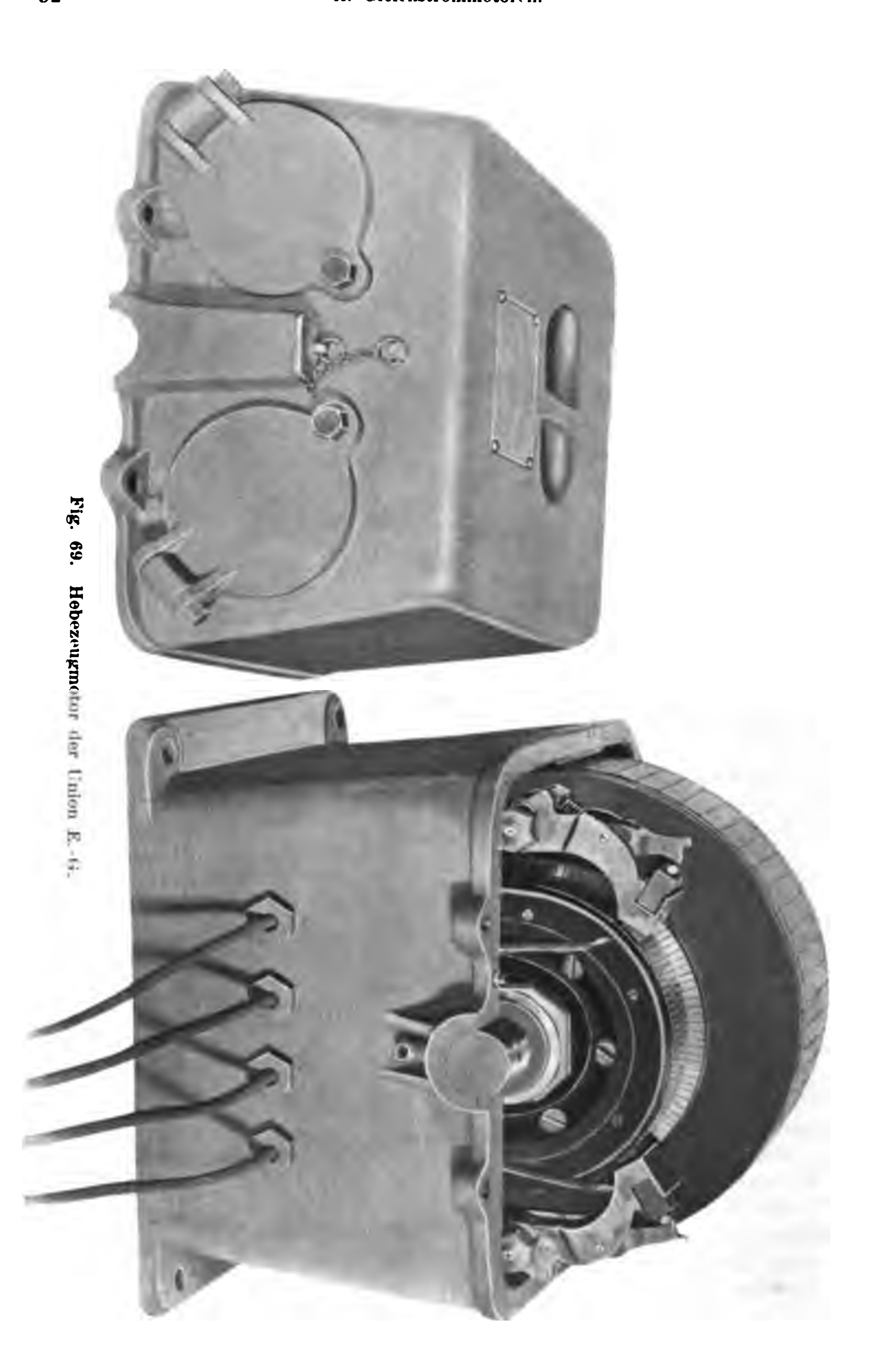


Fig. 69. Hebezeugmotor der Union E.-G.

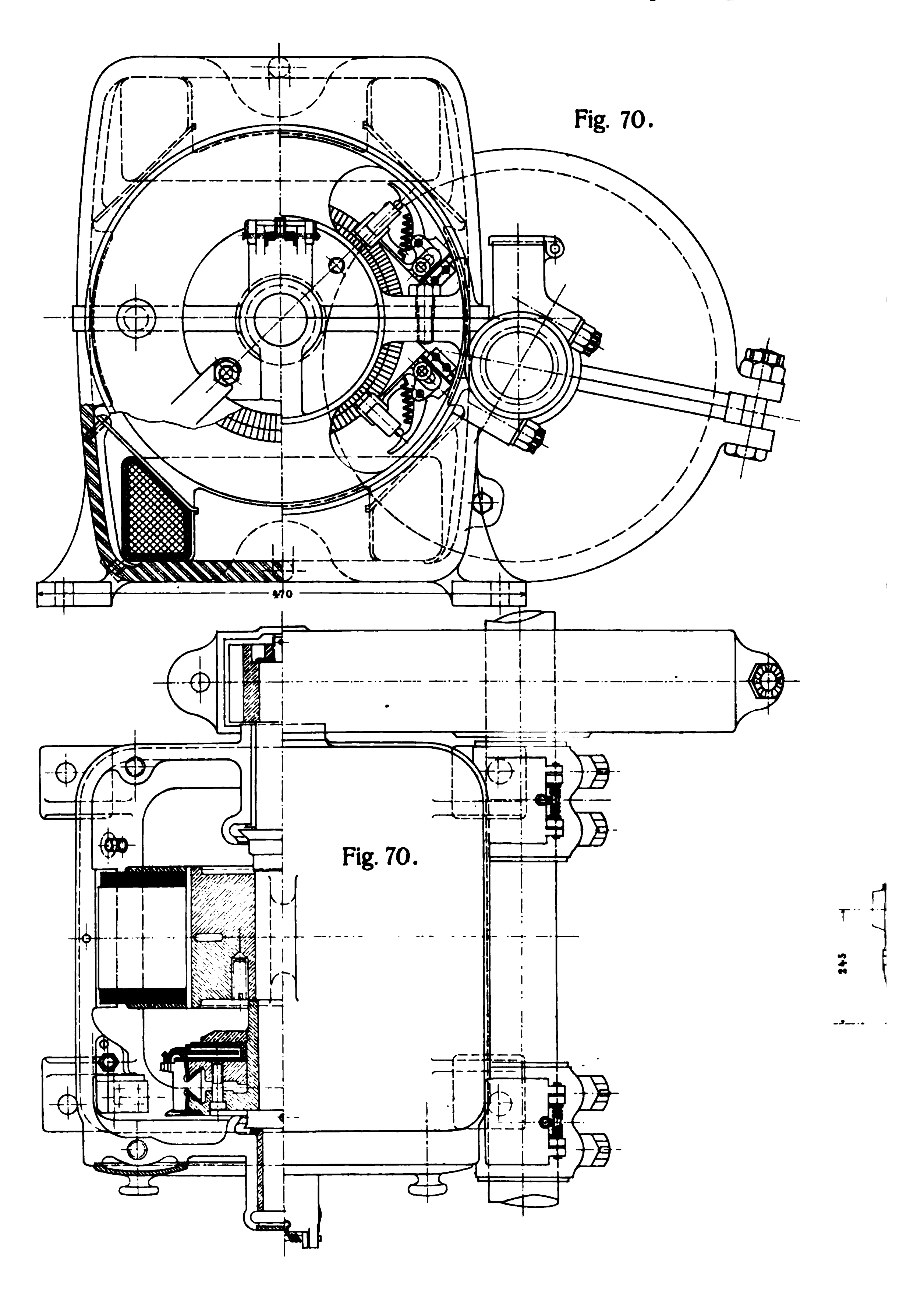



Fig. 70.

Fig. 70.

or der Union B. G.

Fig. 70.

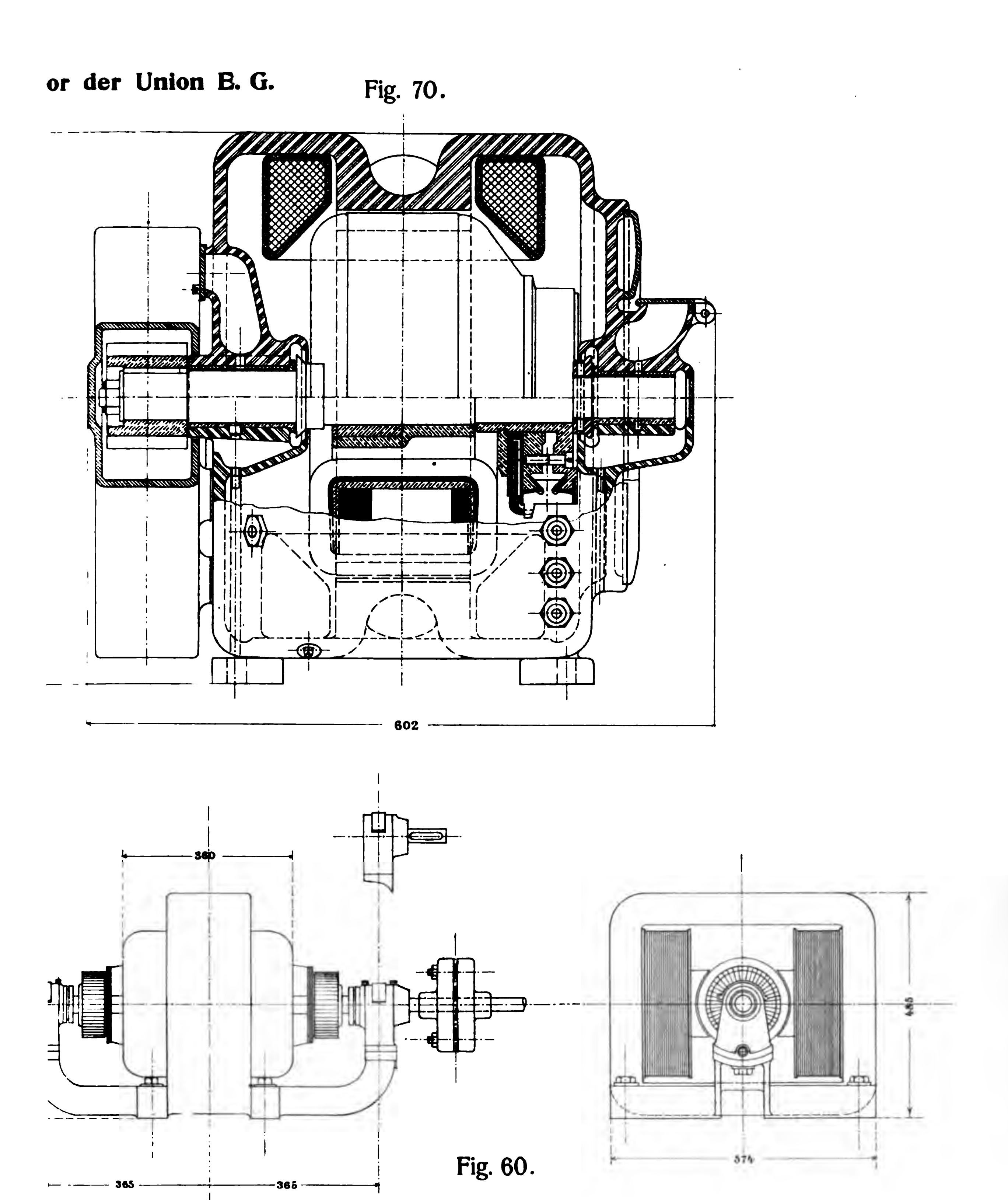



Fig. 60.

Doppelkollektormotor von Schwarzkopf.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Vierpoliger Moto[r]

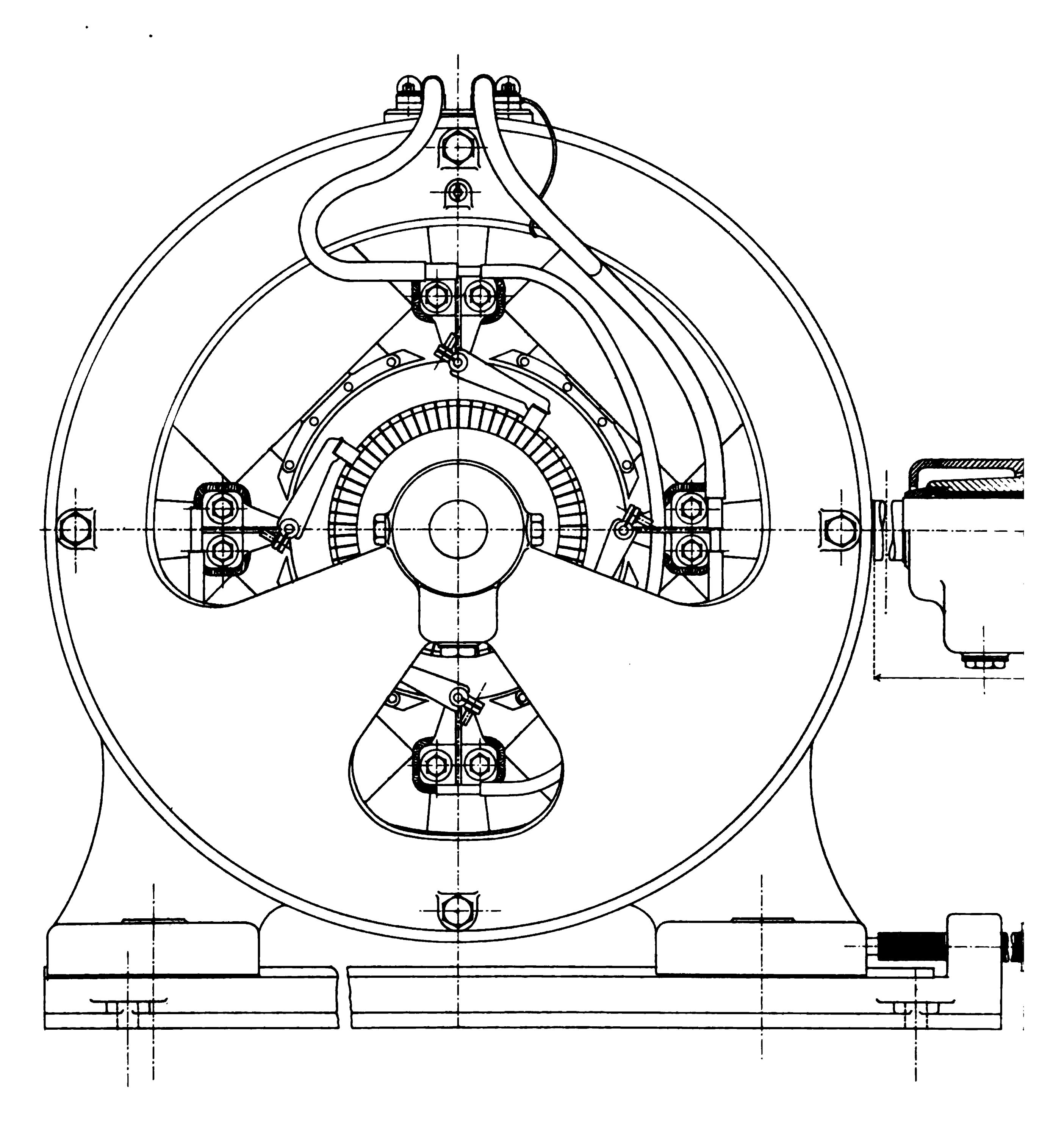
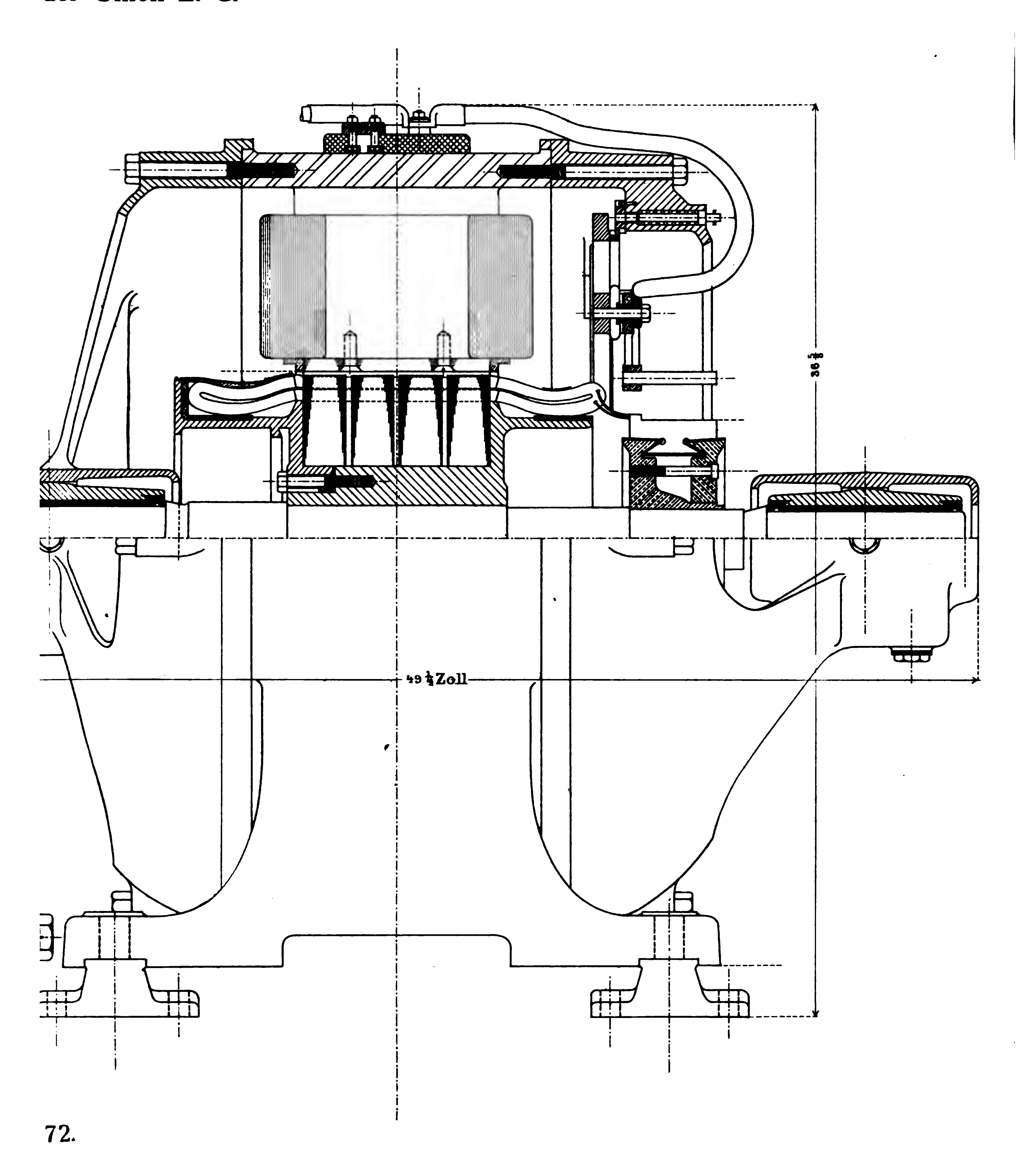


Fig.

**der Union E. G.**




72.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

Fig. 71. Vierpoliger Gleichstrommotor der Union E.-G.

Der schon aus dem Jahre 1881 stammende Motor von GRAMME (Fig. 86) hat hufeisenförmiges Erregergestell aus Schmiedeeisen mit einer Spule auf jedem Schenkel. Das Joch *B* ist als Lager ausgebildet, ein Bronzebügel bildet das andere Lager.

§ 44. Verschiedene Motoren.

Die beiden ventilierten Kapselmotoren (Fig. 87 und 88) sind aus den E. P. No. 13 325 (8. April 1899) und No. 18 172 (22. Juli 1898) entnommen. Der erstere Motor hat eine Reihe Ventilationslöcher und Ventilationsflügel. Beim zweiten Motor sind die Pole oben und unten durchbohrt (Löcher $f_1$).

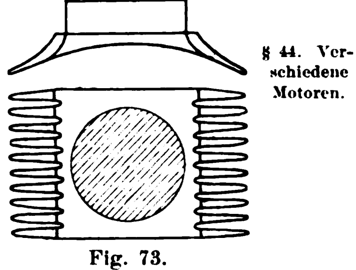


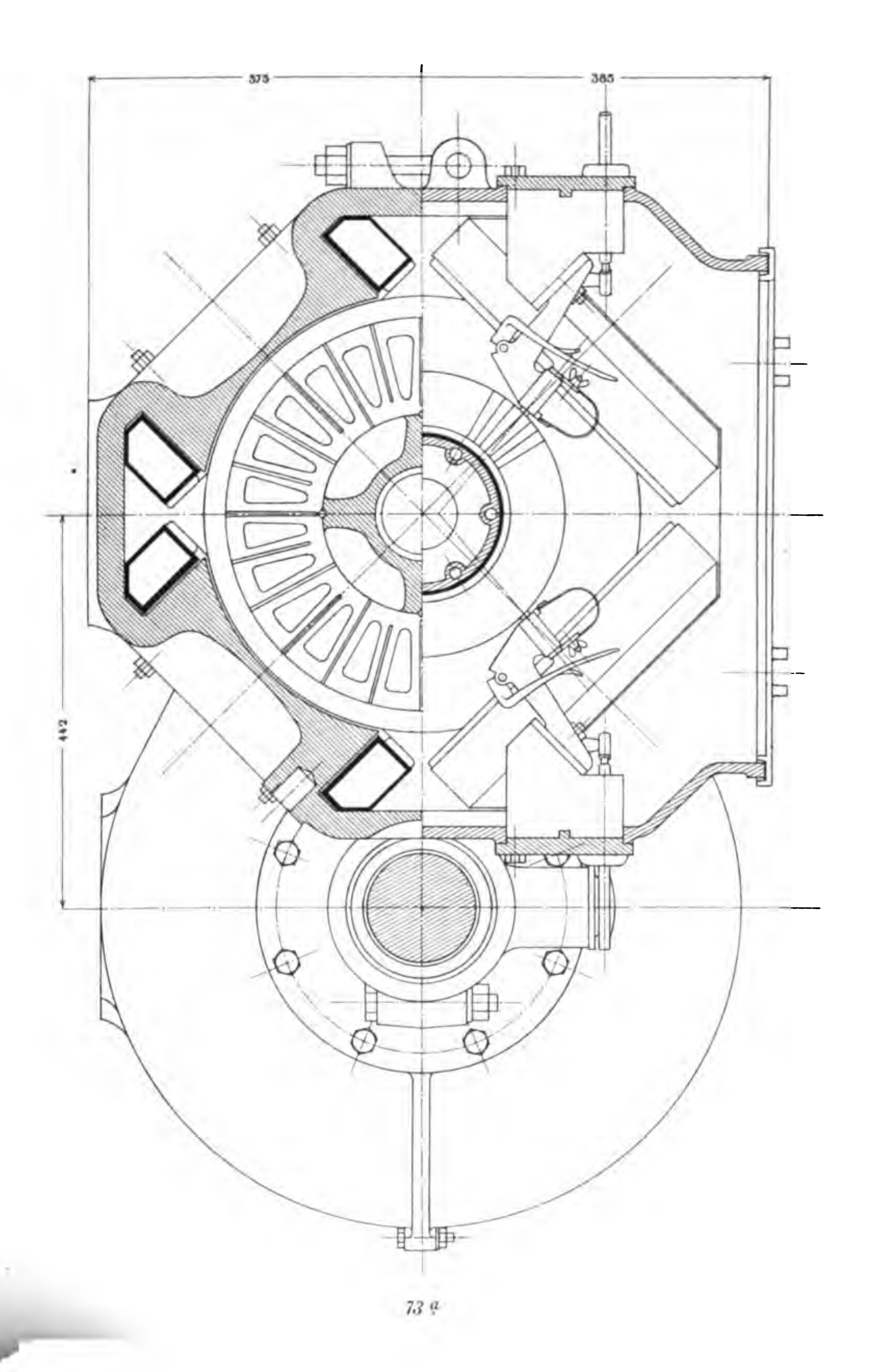
Fig. 73.

Einen originellen Einbau eines Gleichstrommotors stellt Fig. 89 in dem Radnabenmotor[1]) der Hub

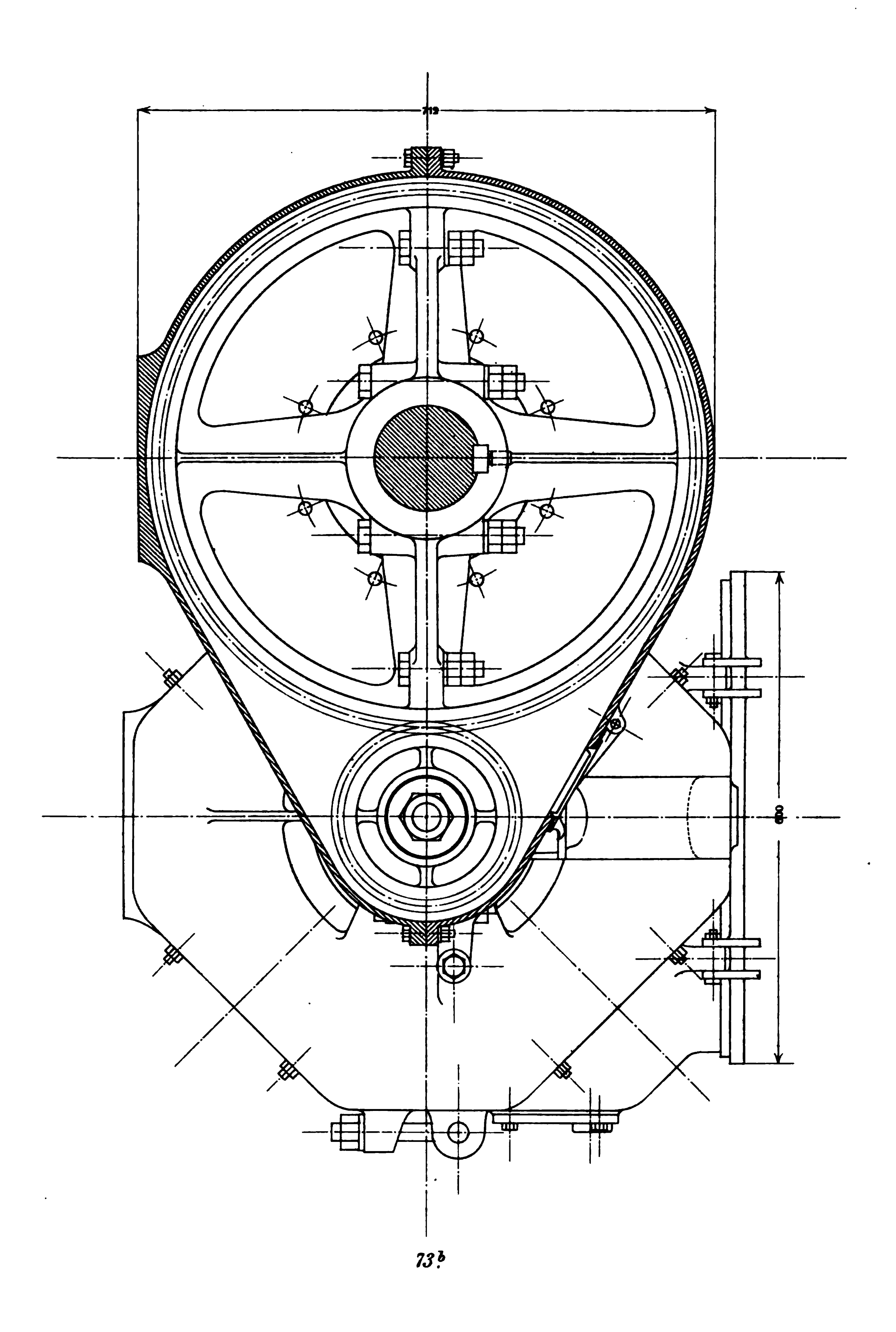
1) Electrical World and Engineer, 3. Februar 1900, S. 173 und Z. V. D. I. 1900.



Fig. 74. Gleichstrommotoren von Kolben & Co. 5 bis 30 PS.

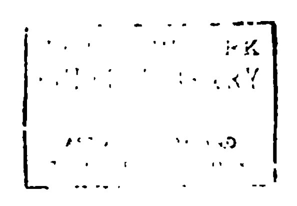


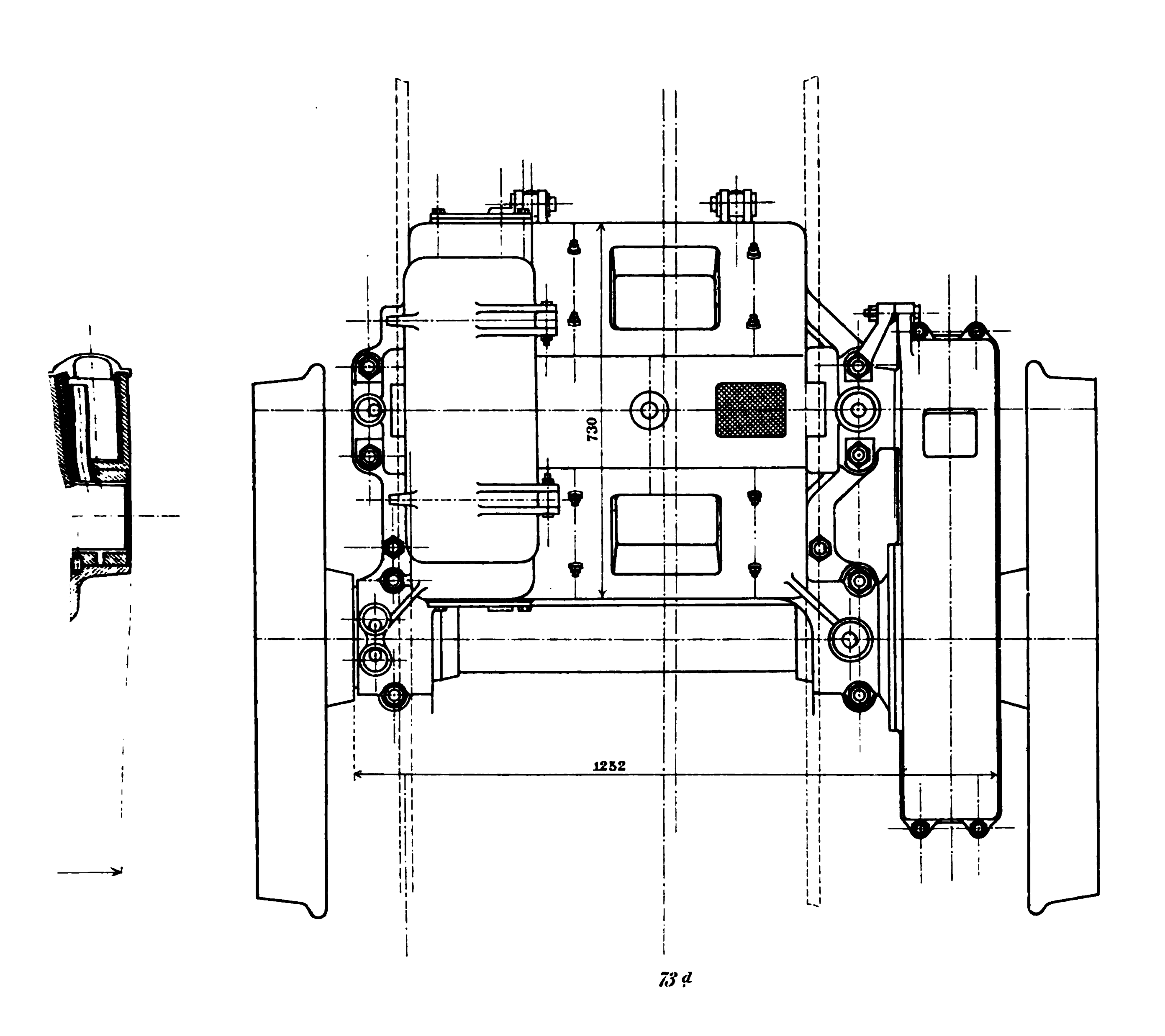

73 a




73.b

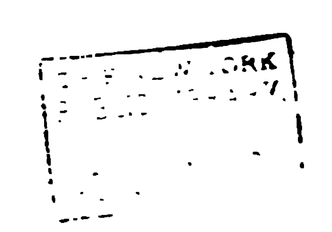
Verlag von S. Hirzel-Leip

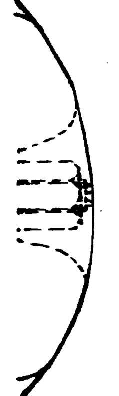





73 d

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.





## Vierpoliger Gleichstrommotor w

**9 PS., 850 Touren.**

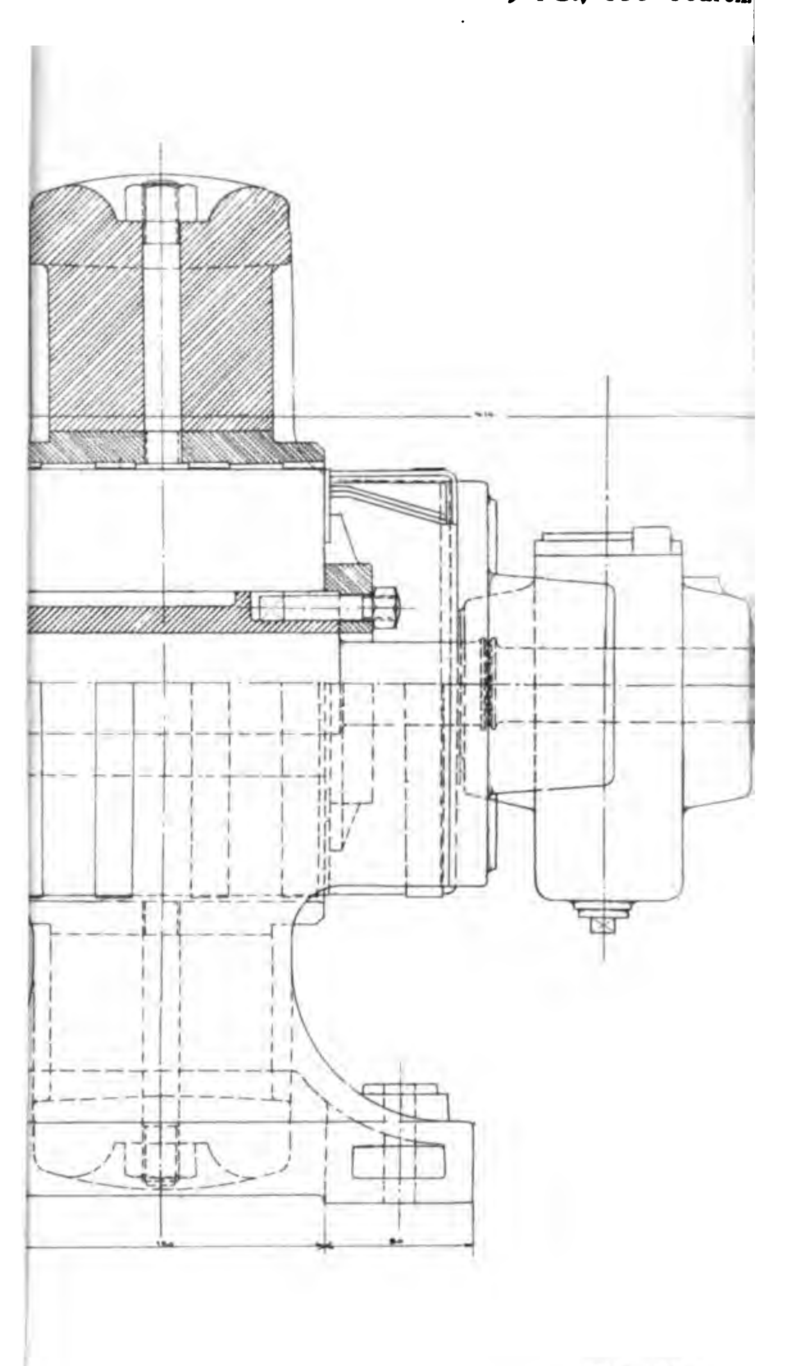
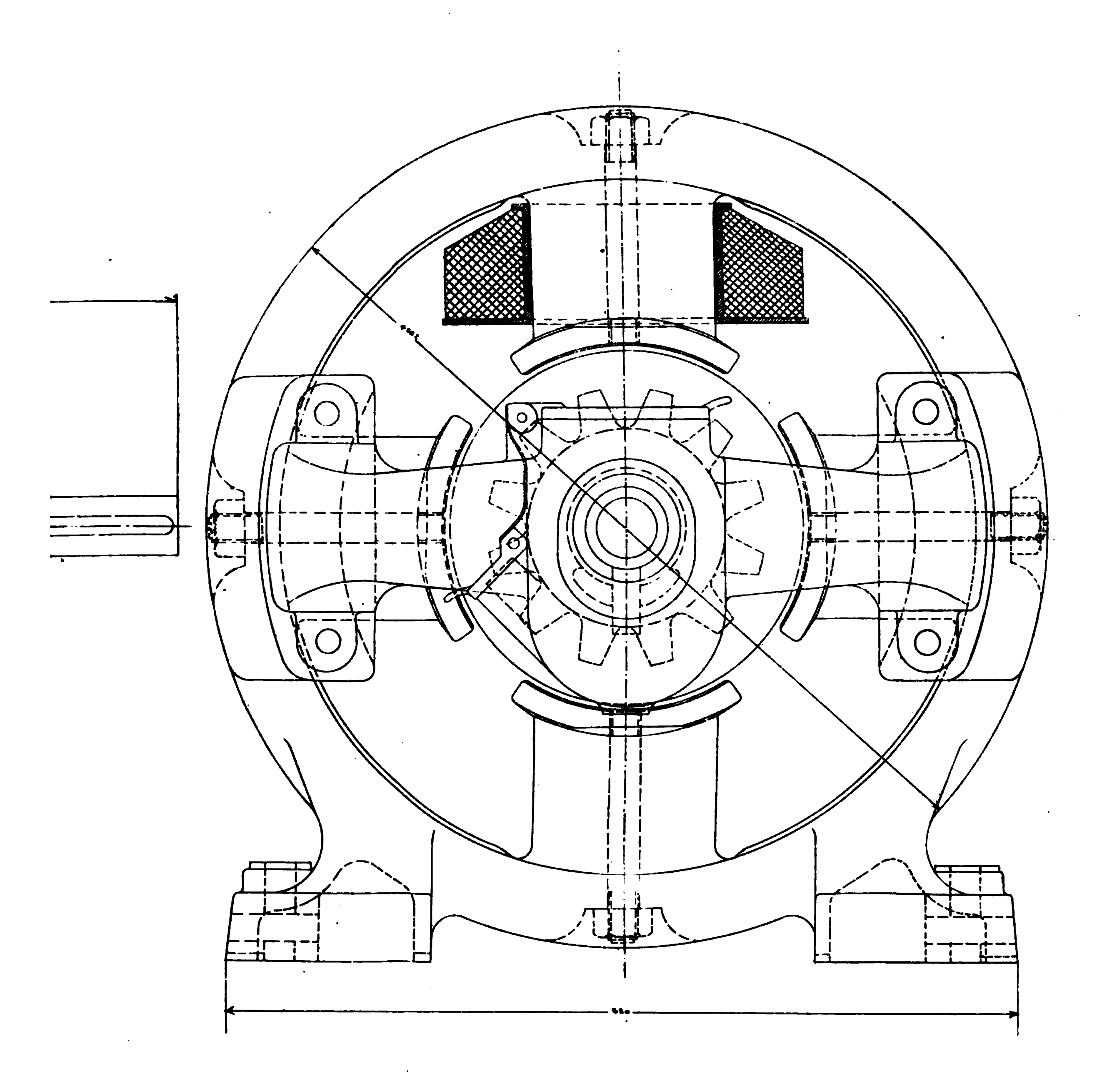


Fig. 75.

**n Kolben & Co.**



*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

Motor Co. in Chicago dar. Die Radnabe ist als vierpoliges Magnetgehäuse ausgestaltet und dreht sich in zwei Kugellagern um die feststehende Wagenachse. Der ebenfalls auf der Achse gelagerte Anker dreht sich in entgegengesetztem Sinne wie das Magnetgehäuse. Der Anker trägt an der inneren Seite ein kleines Zahnrad, das in ein um einen feststehenden Zapfen drehbares Rad eingreift. Dieses treibt ein mit dem Magnetgehäuse fest verbundenes Rad mit Innenverzahnung. Die Gesamtübersetzung beträgt 1 : 6,75. Die Nabe erhält zu beiden Seiten aufgeschraubte Deckel, die auf der einen Seite das Zahnradgetriebe, auf der anderen den Kommutator und die Bürsten schützen. Die Anschlussdrähte für den Anker und für die Feldwicklung sind durch eine Nut in der Wagenachse zu Schleifringen geleitet. — Bei einer ähnlichen Konstruktion für Fahrzeuge ist innerhalb des Spurkranzes der Anker eingebaut. Spurkranz samt Anker dreht sich ausserhalb des feststehenden Schenkelsternes.

Der Doppelelektromotor DRP 105 985 Fig. 90 ist derart konstruiert, dass der Anker jedes der beiden Motoren mit dem Feldmagneten des anderen Motors

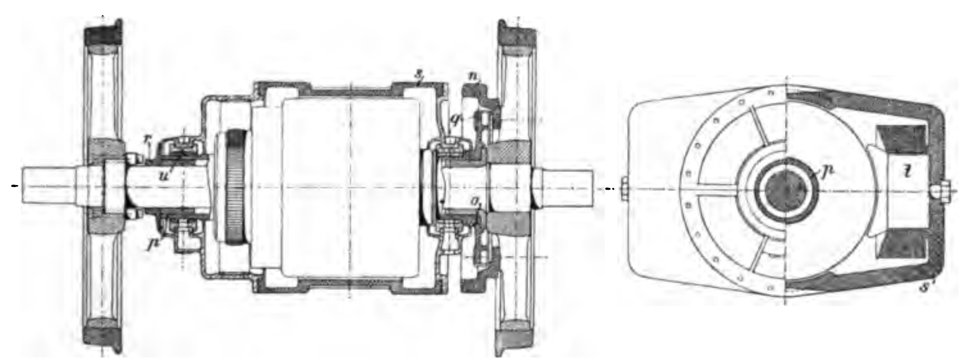


Fig. 76. Bahnmotor von Brown, Boveri & Co.

mechanisch verbunden ist. Der Anker *a* (Fig. 90) des einen und der Feldmagnet *b* des anderen Motors sind auf einer gemeinsamen Welle *e*, der Feldmagnet *d* des ersteren und der Anker *c* des letzteren auf einer die Welle umgebenden Hülse *f* befestigt, sodass sich Hülse und Welle in entgegengesetztem Sinne drehen. Es ist damit möglich, mit einer bestimmten wirksamen Tourenzahl gleich der Summe der beiden entgegengesetzten Umlaufszahlen nur die halbe nutzbare Antriebsgeschwindigkeit zu erzielen, d. h. es wäre dies ein Weg zum Bau langsamlaufender Motoren von geringen Abmessungen, obwohl die Notwendigkeit zweier Maschinen eine gewisse Komplikation bedeutet.

§ 45. Bergmann-Motoren.

Eine ausgedehnte Verbreitung haben neuerdings die nach amerikanischem Muster gebauten Erzeugnisse der Bergmann Elektromotorenwerke Berlin gefunden. Die kleinere sogenannte Lundelltype hat nur eine für alle Pole gemeinsame grosse Erregerspule. Das Gehäuse ist in einer vertikalen Ebene geteilt.[1]) Die mittlere Type (vierpolig) besteht im Gestell aus einem Tragrahmen, an den beide Bügellager angegossen sind und in den der Anker eingelegt wird; dann wird die untere und obere Feldgestellhälfte an diesen

1) Niethammer, Elektrische Hebezeuge, S. 73, Fig. 125.



Fig. 77. Serienmotoren der Cie de l'Ind. El. Genf.

Rahmen angeschraubt. Die lamellierten Pole sind aufgeklemmt. Die Nuten erhalten eine besondere geschweifte Form zwecks Vergrösserung der Aufnahmefähigkeit (D. R. P. 109 941) und aus den Zähnen werden schmale Streifen ausgestanzt. Vielfach wird Feld und Anker aus demselben Blech gestanzt.

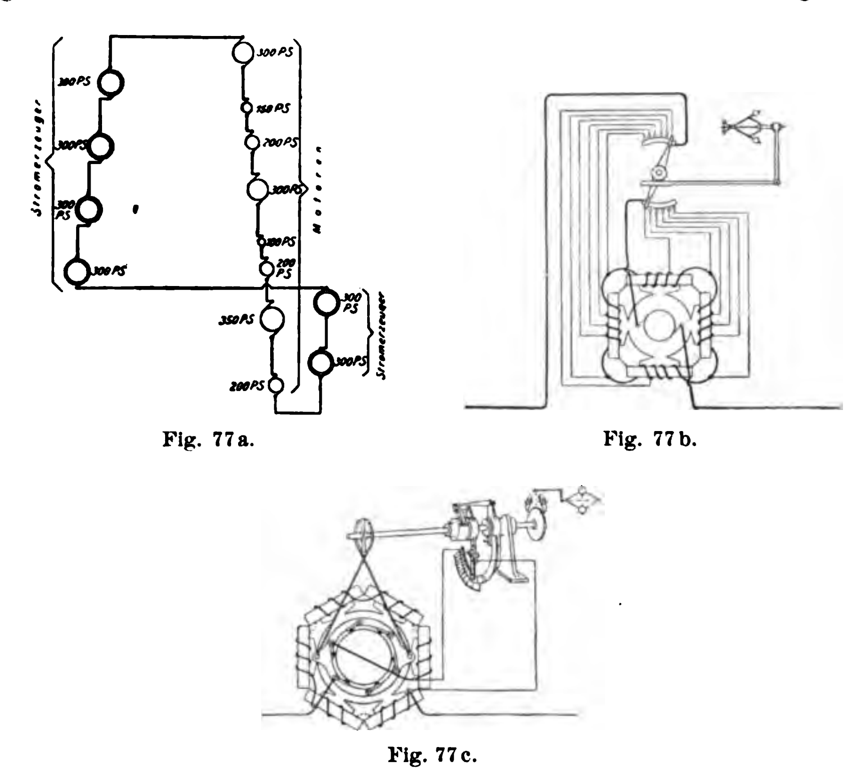


Fig. 77a. Fig. 77b.

Fig. 77c.

Der durch E. P. No. 7978 vom Jahre 1899 geschützte Lundell-Motor (Fig. 90a) hat ein aus vier Teilen gestanztes, lamelliertes Feldgestell. Zwi-

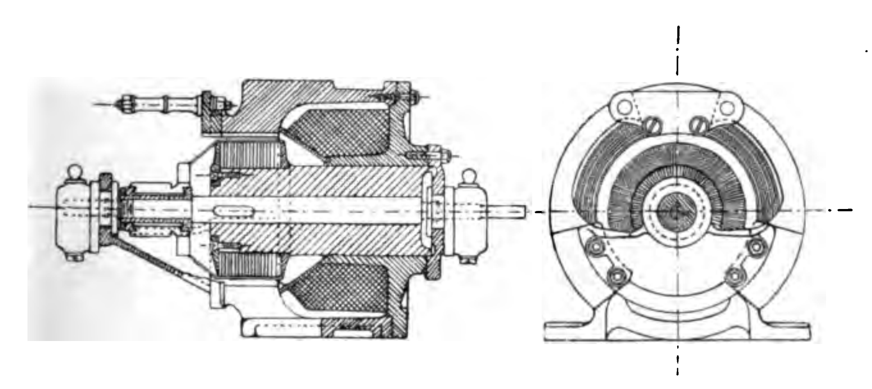


Fig. 78. Gleichpoltype der Cie de l'Ind. El. Genf.

schen Polkern und Spule liegen keilförmige Polansätze, welche die Spulen festhalten und welche die Felddichte allmählich abflachen, da ihr magnetischer Widerstand grösser ist als derjenige der Kerne. Den zu dem Motor gehörigen Bürstenhalter zeigt Fig. 90b.

c) Pole aus Stahlguss aufgeschraubt (α und β wie bei a), lamellierte oder gusseiserne oder stählerne Polschuhe aufgeschraubt,
d) lamellierte Pole ohne Polschuhe oder mit aufgeschraubten Polschuhen in das Joch eingegossen.

3) Joch aus Stahl,
  a) mit angegossenen Stahlpolen,
    α) ohne Polschuhe,
    β) mit aufgeschraubten Polschuhen (aus Stahl, Gusseisen oder lamelliert).
  b) mit aufgeschraubten Polen,
    α) Pole samt Polschuhen ein Stück,
    β) Polschuhe besonders aufgeschraubt.

4) Joch samt Polen und eventuell samt Anker lamelliert gestanzt, gewöhnlich ohne Polschuhe.

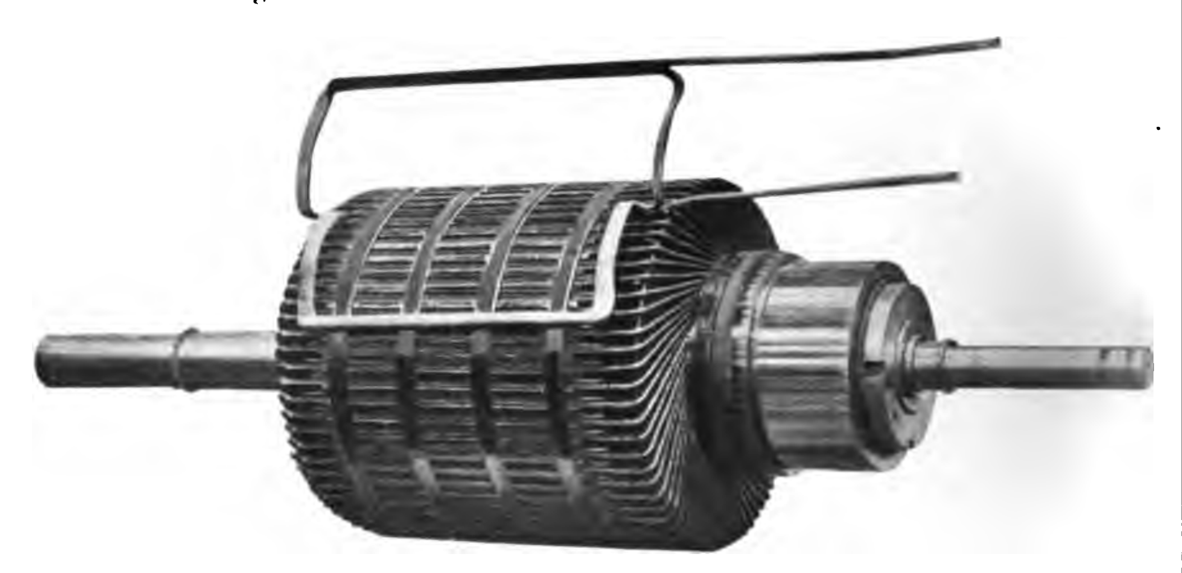


Fig. 83. Gleichstromanker von Oerlikon.

Bei grossen Motoren wird hier und da das Gehäuse verschiebbar angeordnet
  a) in der Achsrichtung,
  b) in zwei Hälften senkrecht zur Achse.

B) Erregerspulen.
  1) Jeder Pol mit eigener Erregerspule.
  2) Jeder andere Pol mit Erregerspule (Folgepole).
  3) Gemeinsame Erregerspule für sämtliche Pole.

C) Verbindung des Gehäuses mit den Lagern.
  1) Lagerschilder oder Lagerbügel.
    a) Beide Lagerschilder oder -bügel angeschraubt,
      α) cylindrisch angepasst,
      β) nur in zwei oder drei ebenen Flächen angepasst,
    b) ein Lagerschild angegossen, das andere angeschraubt,

c) beide Lagerbügel mit einem durch das Feldgehäuse laufenden Tragrahmen zusammengegossen, der auf der unteren Hälfte des Feldgestells ruht und auf den die obere Gestellhälfte aufgelegt wird (BERGMANN),

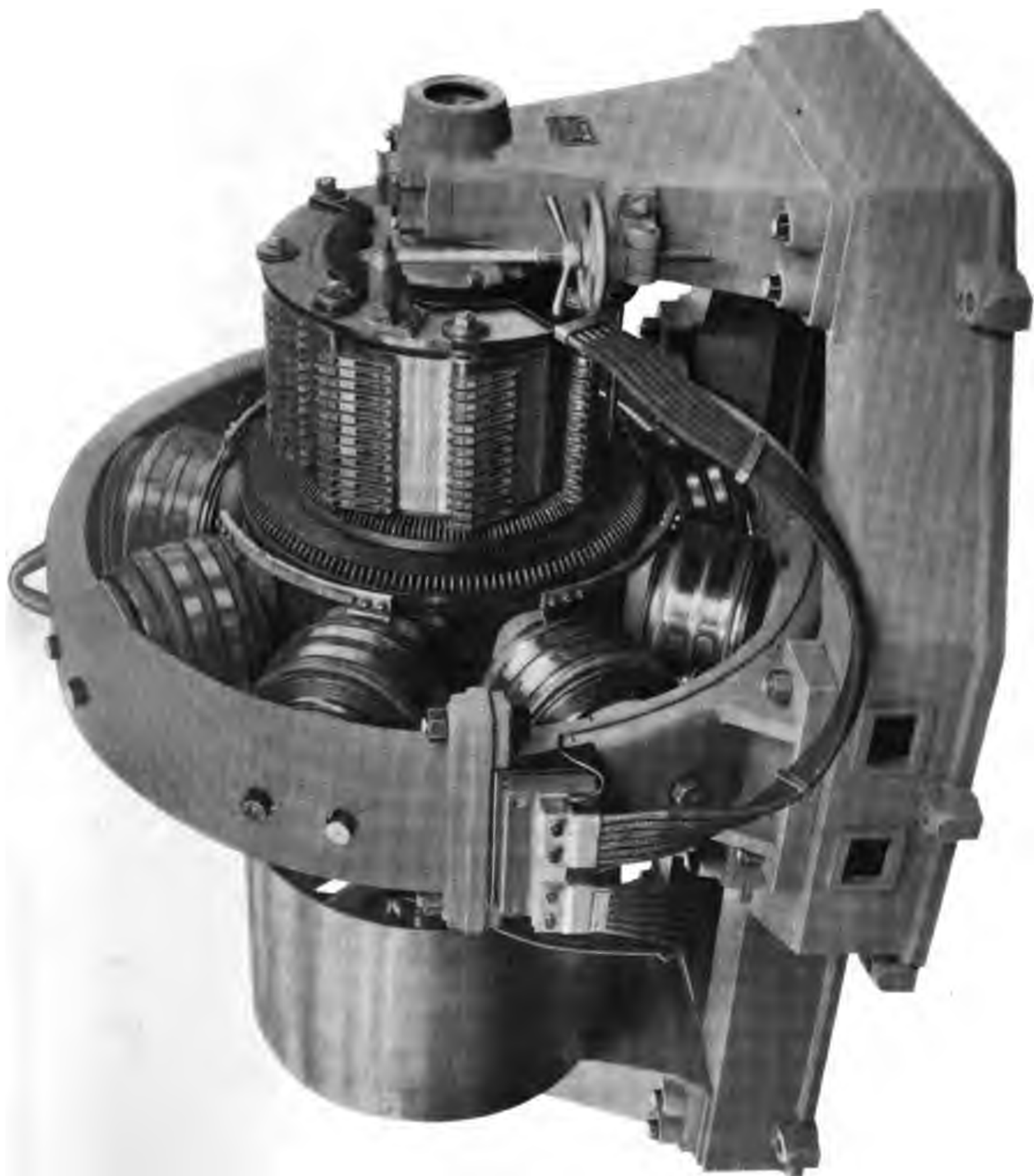


Fig. 83a. Gleichstrommaschine von Oerlikon.

d) beide Lagerschilder mit dem Gestell zusammengegossen, letzteres senkrecht zur Achse geteilt.

Bei grossen Typen sind die Lagerschilder geteilt.

2) Korblager.

a) Der eigentliche Lagerbock ist in einer cylindrisch ausgedrehten Fläche, deren Radius grösser als der Ankerradius ist, aufgeschraubt. Gestell einteilig (NG-Type der A. E. G.),

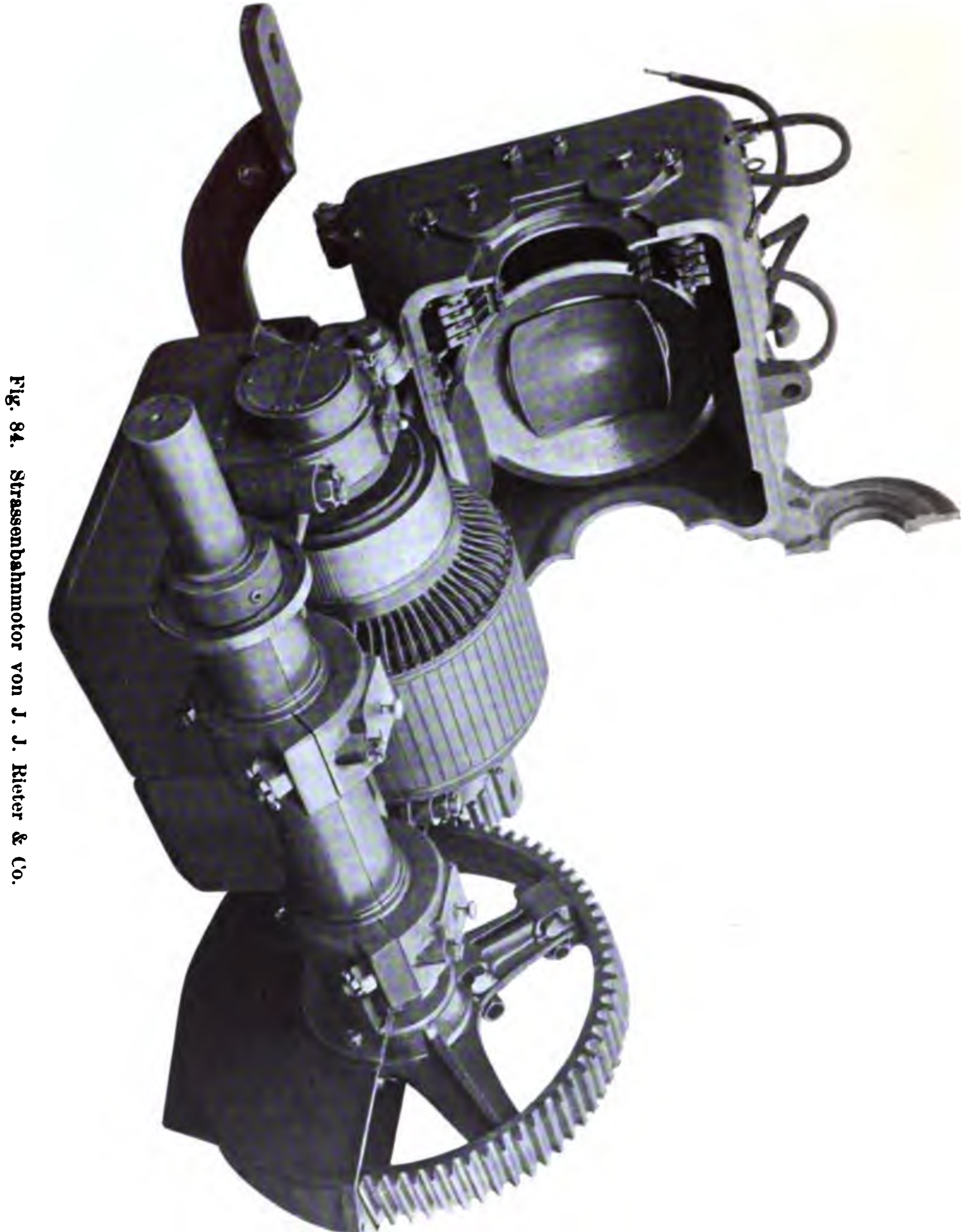


Fig. 84. Strassenbahnmotor von J. J. Rieter & Co.

b) Lagerbock an den Korb angegossen, Gestell und Lager zweiteilig.

3) Lagerböcke (Stehlager) und Grundplatte.

a) Lagerböcke an die Grundplatte angegossen. Lager und Gestell zweiteilig,

*α*) untere Gestellhälfte angegossen,
*β*) untere Gestellhälfte angeschraubt,
b) Lagerböcke auf gehobelten Flächen der Grundplatte befestigt,

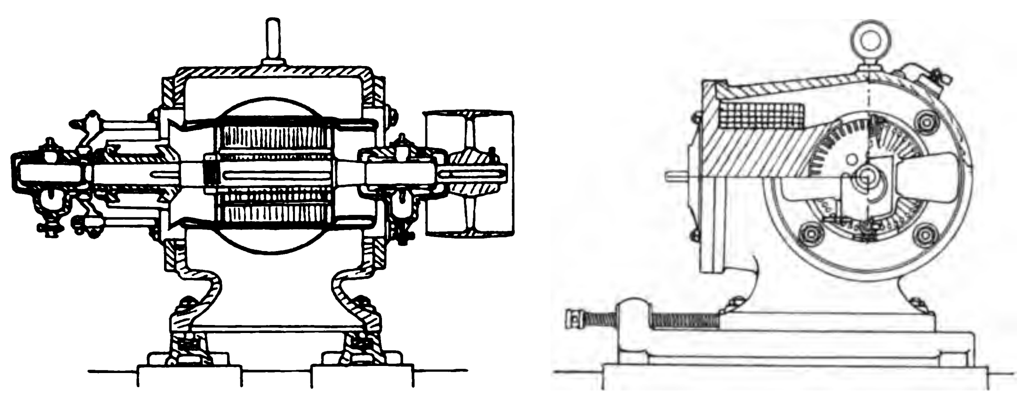


Fig. 85. Zweipoliger Motor von Fischer-Hinnen.

*α*) Lager und Gestell ungeteilt,
*β*) Lager und Gestell horizontal oder vertikal geteilt.

Das Gestell kann an die Grundplatte angegossen oder angeschraubt sein.

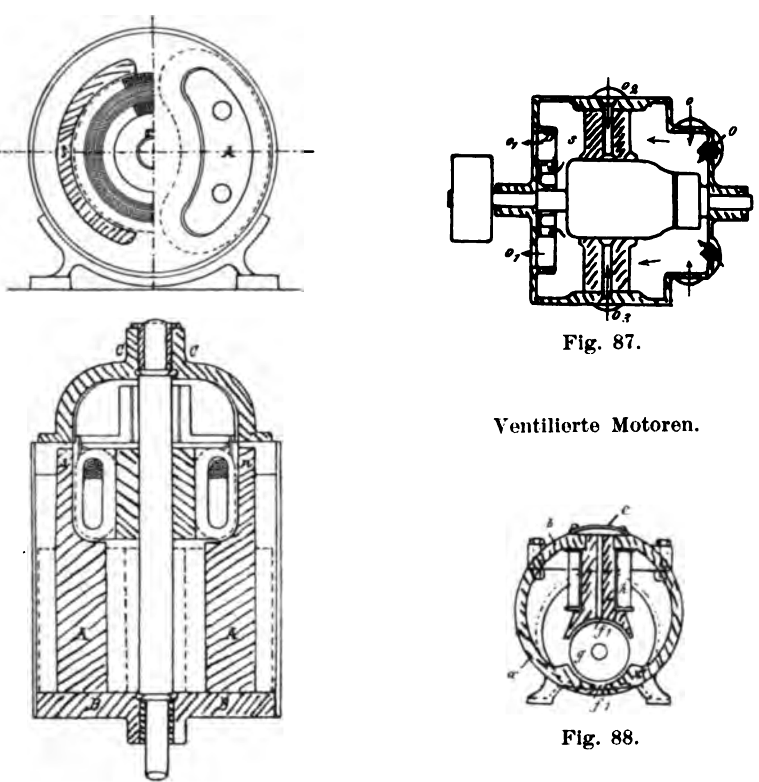


Fig. 87.

Ventilierte Motoren.

Fig. 88.

Fig. 86. Zweipoliger Motor von Gramme.

c) Lagerböcke auf gedrehten Flächen der Grundplatte befestigt.

D) Lager.
1) a) Ungeteilt,
b) geteilt.

2) a) Lagerschalen kugelig gelagert,
α) im Lager cylindrische, an der Lagerschale kugelige Fläche.
β) beide Flächen kugelig,
b) Lagerschalen ein-, zwei-, dreimal cylindrisch gelagert.
3) a) Mit Ringschmierung,
b) mit Fettschmierung oder Dochtschmierung (selten).

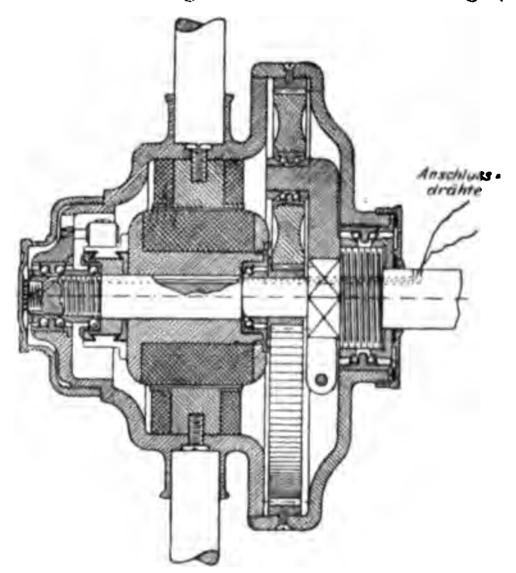



Fig. 89. Radnabenmotor.

4) a) Lagerschalen aus Bronze (für kleine Typen),
b) Lagerschalen aus Gusseisen mit Weissmetall ausgegossen.

E) Anker.

Nutenanker oder glatte. Trommel- oder Ringwicklung, erstere als Seiten- oder Fasswicklung. Hand- oder Schablonenwicklung. Draht-

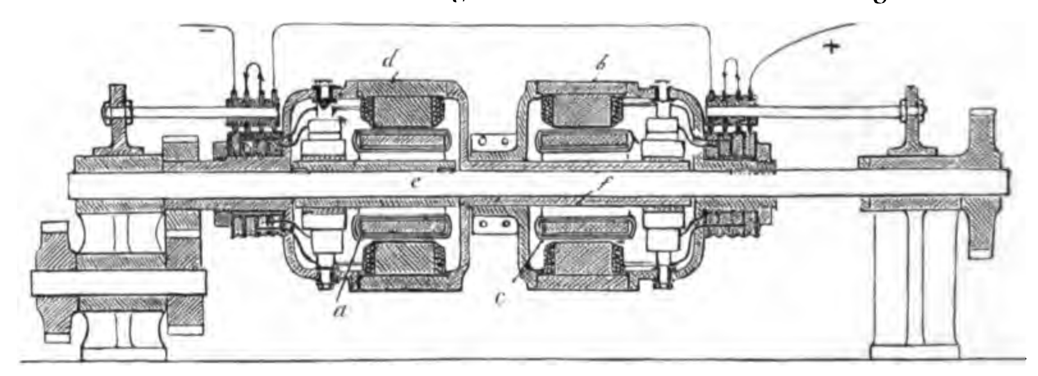



Fig. 90.

oder Stab- oder Litzenwicklung. Ankerbleche auf die Achse geschoben oder auf einem Armstern zwischen zwei Flanschen befestigt, wovon die eine angegossen sein kann. Zusammenpressen der Bleche
a) durch Schrauben und zwar durch kurze Stift- oder Kopfschrauben oder mittelst durchgehender Schrauben (inner- oder ausserhalb der Bleche),

b) durch Bajonettverschluss,
c) durch Sprengringe (kolbenringartig),
d) durch Keile in der Umfangsrichtung.

Aufnahme der Umfangskraft durch rechteckige, trapezförmige oder runde Längskeile.

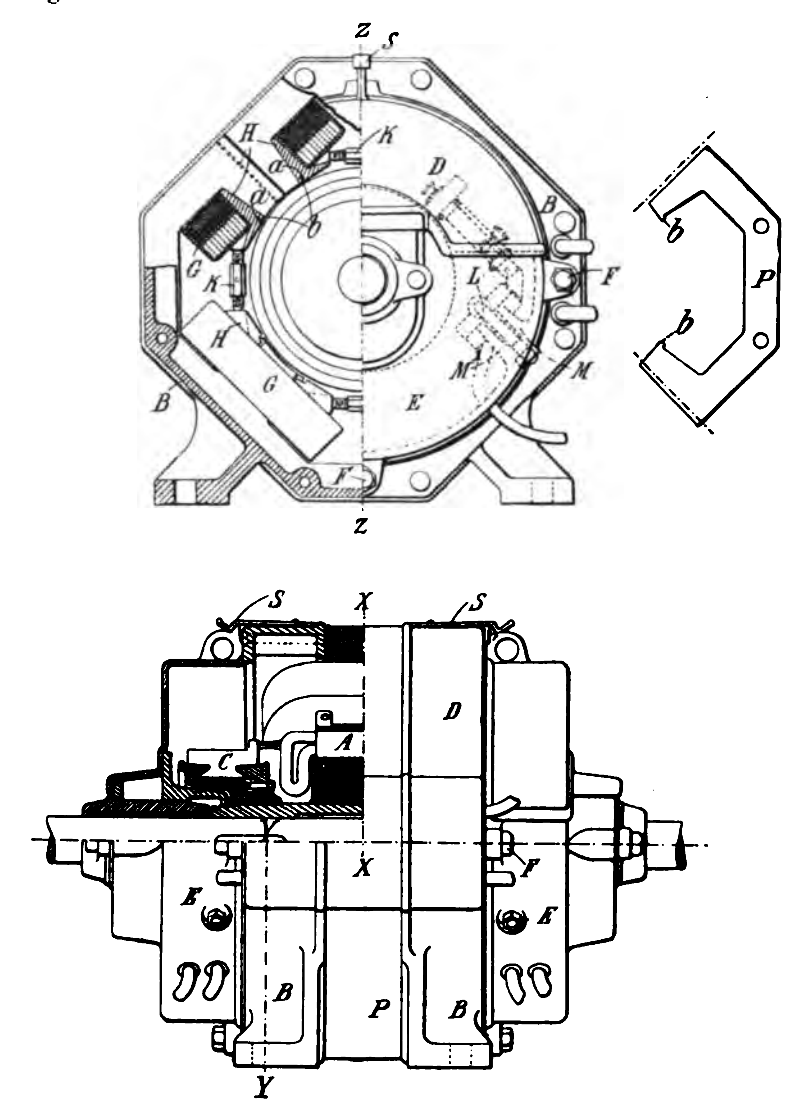


Fig. 90a. Lundellmotor.

Bleche aus ganzen Ringen (bis 1 m Durchmesser) oder aus Segmenten von 400—1200 mm Länge. Nuten gefräst oder gestanzt und zwar einzeln oder sämtliche Nuten eines Segmentes oder eines Ringes auf einmal.

F) Kollektor auf die Achse gekeilt oder fliegend an den Ankerkörper geschraubt. Lamellen aus hartgezogenen Kupfer (meist) oder harter Bronze. Festpressen der Lamellen durch konische oder cylindrische

Ringe oder einzelne Kohlenstücke (Pressstücke). Kohlenbürsten usw. oder Kupfergaze-, Messinggewebe-, Kupferblätter-, Messingblattbürsten;

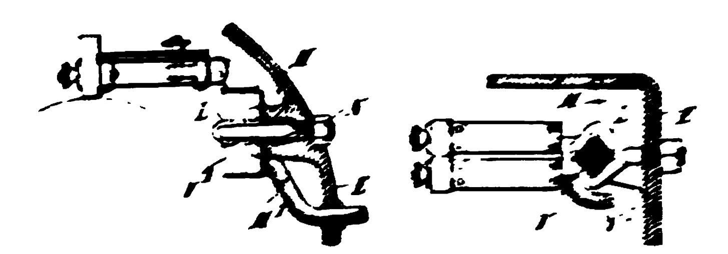


Fig. [illegible]. Lundell[illegible]

oder Kupfer-Kohlenbürsten. Kurz- oder Streifenbürsten. Pinsel- und feste Bürsten. Bürstenhalter [illegible] an Lagerbock oder an Feldgestell befestigt.

6. Antrieb.

1. mittelst Riemscheibe:
   a) fliegend,
   b) mit drittem Lager.
2. mittelst Seilscheibe.
3. Zahnradübersetzung.
4. Reibungsgetriebe.
5. direkte Kupplung (Pumpen, Ventilatoren).

# B. Ein- und mehrphasige Wechselstrom-motoren.

## I. Einteilung.

Während es eigentlich nur eine einzige Art Gleichstrommotoren, die einfache Umkehr der Gleichstrommaschine giebt, lassen sich Wechselstrommotoren nach einer Reihe verschiedener Prinzipien bauen. In der Praxis hat sich allerdings im wesentlichen nur der asynchrone Induktionsmotor eingebürgert. Die Wechselstrommotoren können einphasig oder mehrphasig sein. Es lassen sich unterscheiden

§ 47. Einteilung der Wechselstrommotoren.

1) Eigentliche Synchronmotoren, die Umkehr der gewöhnlichen Wechselstromgeneratoren, mit gleichstromerregten Aussen- oder Innenpolen, auch die Induktions- oder Gleichpoltype eingerechnet.

2) Induktionsmotoren ohne Kommutator mit in sich oder auf Widerstand geschlossenem Anker. Sie sind im allgemeinen asynchron. STEINMETZ heisst einen Induktionsmotor mit einem Anker, der nur einen geschlossenen Stromkreis enthält, synchron, da er bei Synchronismus ein Drehmoment entwickeln kann.

3) Induktionsmotoren mit Kommutator im induzierten Teil.

4) Konduktionsmotoren, d. h. Motoren, deren feststehende und rotierende Wicklungen direkt leitend mit dem Netz verbunden sind. Der rotierende Teil besitzt einen Kommutator. Wie bei Gleichstrom kann man hierbei unterteilen in

a) Serienmotoren,
b) Nebenschlussmotoren,
c) fremderregte Motoren.

5) Hysteresis- und Reaktionsmotoren, deren Drehmoment durch die hysteretische Verzerrung oder durch ungleichmässige magnetische Reluktanz oder Schirmwirkung erzeugt wird.

## II. Historisches.

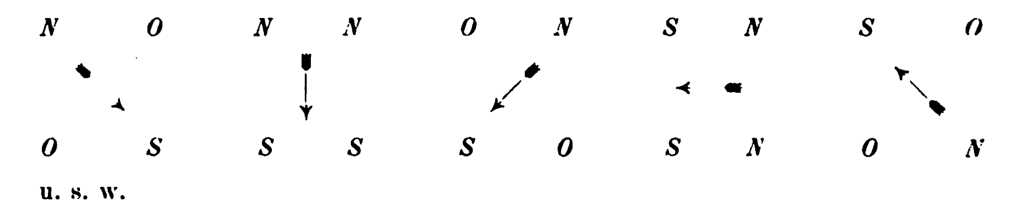
Die Geschichte des Synchronmotors ist seiner ganzen Eigenart halber ziemlich identisch mit derjenigen des Wechselstromgenerators, wenn auch die Beobachtung, dass eine Wechselstrommaschine, die einmal in Be-

§ 48. Geschichte des Synchronmotors.

wegung ist, durch Einleiten von Wechselstrom als Motor weiterläuft, erst etwas späteren Datums ist und anfangs weniger benutzt wurde. RITCHIE verwendete 1836 die Maschinen von PIXII & SAXTON als Motoren. WILDE schaltete 1868 Wechselstrommaschinen parallel und entdeckte dabei, dass eine derselben auch als Motor eine oscillierende Bewegung ausführen konnte. HOPKINSON leitete diese Resultate im Jahre 1884 theoretisch ab und benutzte die Wechselstrommaschinen des Leuchtturms South Foreland, an denen er seine klassischen Versuche des Parallelschaltens machte, auch als Synchronmotoren.

§ 49. Erste Anfänge der Induktionsmotoren.

Die ersten grundlegenden Versuche, auf denen die Induktionsmotoren basieren, sind in die Jahre 1824 und 1825 zurückzuverlegen, wo ARAGO die hemmende bezw. dämpfende Wirkung der Wirbelströme entdeckte. Die Umkehrung des eigentlichen ARAGOschen Versuches (Ablenkung einer Magnetnadel durch eine rotierende Kupferscheibe) besteht darin, dass ein Magnet unter einer drehbaren Kupferscheibe in Umlauf versetzt wird, wobei letztere sich vermöge einer Induktionswirkung mitdreht. Allerdings erst WALTER BAILY (1879) verdankt der Induktionsmotor in der elementarsten Form seinen Ursprung: BAILY stellt vier Elektromagnetkerne im Kreise auf und befestigt über denselben eine bewegliche Kupferscheibe. Je zwei erregende Spulen sind kreuzweise hintereinander geschaltet. Die beiden Stromkreise werden mit einem umlaufenden Unterbrecher verbunden, der die Anschlussklemmen zweier Batterien derart verbindet, dass die vier Polflächen abwechselnd folgende kreisende Polarität zeigen[1]):




u. s. w.

Im Jahre 1880 zeigte MARCEL DEPREZ den Apparat Fig. 91, der aus zwei Ankern auf gemeinsamer Achse besteht, welche sich zwischen den Polen zweier Hufeisenmagnete drehten. Die Ankerachsen waren um 90° verdreht und wurden vermittelst Schleifringen von einer Batterie aus durch Zweiphasenströme gespeist, die ein Stromwender erzeugte. Im Jahre 1883 legte DEPREZ der Académie des Sciences eine Abhandlung über die Erzeugung eines Drehfeldes durch Zusammensetzung von zwei Wechselfeldern vor, deren Phasenunterschied eine Viertelperiode betrug.

1884 bespricht ELIHU THOMSON die elektroinduktive Repulsion, welche Wechselstrommagnete auf Kupferscheiben ausüben.

§ 50. Ferraris. Tesla. Neuzeit.

Professor GALILEO FERRARIS in Turin baute 1885 den Motor Fig. 92. Er bestand aus zwei Paaren Elektromagneten $AABB$, die durch zwei um 90° verschobene Wechselströme gespeist wurden, wobei sich der innere drehbare Teil in Bewegung setzte. In einer Abhandlung „Rotazioni elettrodinamiche“, setzt er 1888 die geometrische Theorie des Drehfeldes auseinander und giebt an, dass man phasenverschobene Wechselströme dadurch erzeugen

1) S. THOMPSON, Mehrphasige Ströme.

könne, dass man einen gegebenen Wechselstrom in zwei Zweige spalte, von denen der eine induktionsfreien Widerstand, der andere widerstandsfreie Selbstinduktion enthalte. Als rotierenden Motoranker benutzte FERRARIS einen hohlen geschlossenen Kupfercylinder, der z. B. bei einer Ausführung nach Fig. 92 etwa 5 kg wog. Die Zugkraft dieses Apparates war aber immer noch gering.

BOREL (Patent BOREL & PACCAUD) baute 1887 einen Elektrizitätszähler auf dem Prinzip des Zweiphasenmotors, wobei die Phasenverschiebung durch

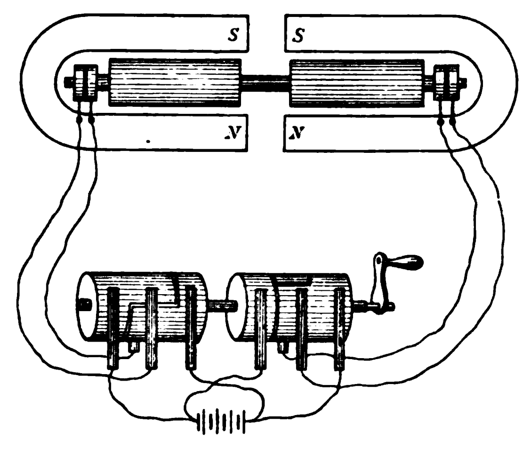



Fig. 91.

Benutzung zweier Stromzweige von verschiedener Zeitkonstante erzeugt wurde. Die Helios E. A. G. konstruierte im gleichen Jahre nach einem Patent von COERPER synchrone und asynchrone Motoren mit Gleichstromanker, wovon

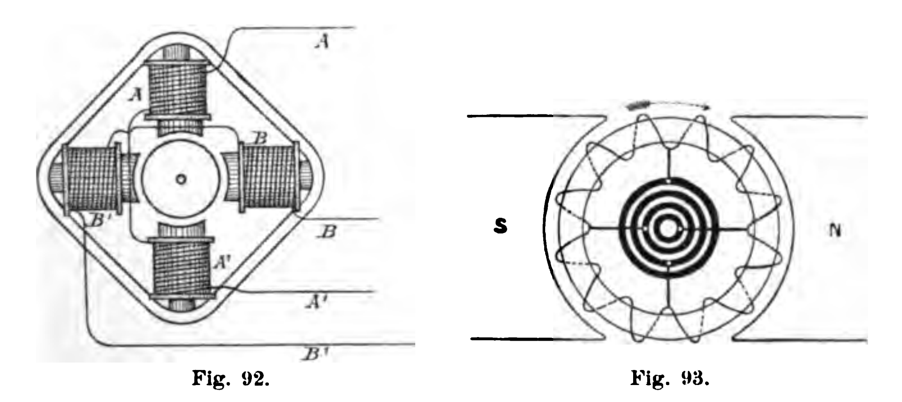



Fig. 92. Fig. 93.

einer auch dreiphasig, d. h. mit drei Schleifringen auf der Ankerachse ausgeführt wurde.

Im Frühjahr 1887 reichte der Amerikaner CHARLES S. BRADLEY ein Patent auf den Stromerzeuger Fig. 93 ein, eine richtige Zweiphasenmaschine zur Erzeugung von um 90° verschobenen Strömen. Einer seiner Patentansprüche lautet derart, dass diese Maschine auch als Motor verwendet werden kann, wenn den Schleifringen Zweiphasenstrom zugeführt wird. Später beschreibt er dieselbe Anordnung als asynchronen Motor, dessen Moment

durch die in der äusseren Masse erzeugten Wirbelströme entsteht. 1889 wurde BRADLEY eine gleichartige Maschine für Dreiphasenströme patentiert.

Dr. DUNCAN giebt 1888 folgende Wechselstrommotorformen an: 1) Einen gewöhnlichen Serienmotor, 2) die Umkehrung einer Wechselstromdynamo durch Gleichstrom erregt, 3) die Umkehrung einer Wechselstromdynamo mit Kommutator auf der Welle, 4) Motoren auf der THOMSONschen Repulsion beruhend.

NIKOLA TESLA[1]) hat unabhängig von den besprochenen Konstruktionen durch seine Arbeiten in den Jahren 1887—1891, die in einer grossen Zahl amerikanischer Patente niedergelegt sind, dem Drehstrommotor auf eine praktische Grundlage verholfen. Ihm war es hauptsächlich darum zu thun, den Kommutator zu umgehen. Er giebt als Hauptgesichtspunkt seiner Konstruktion an: Der verwendete Motor besitzt zwei oder mehr unabhängige Stromkreise, durch die Wechselströme in geeigneten Zwischenräumen gesandt werden, um ein allmähliches Verschieben der Kraftlinien hervorzubringen, wodurch

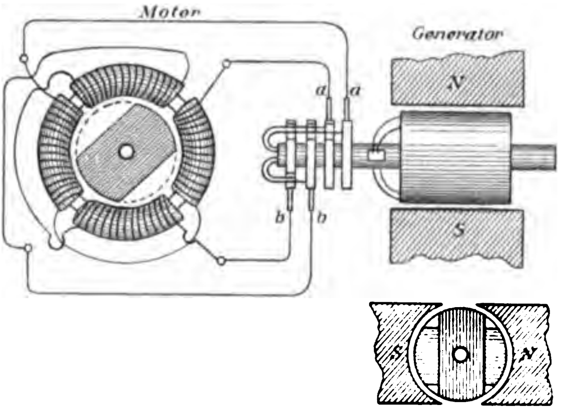



Fig. 94.

der Motor in Bewegung gebracht wird. Dieses kreisende Verschieben der Kraftlinien kann ohne Kommutator oder Umschaltung vollzogen werden, falls man den Motor unmittelbar mit einem geeigneten Wechselstromerzeuger verbindet. Ein solcher Stromerzeuger samt zugehörigem Motor ist in zweiphasiger Ausführung in Fig. 94 gezeichnet. Innerhalb des äusseren Motorringes ist als Anker eine drehbare Scheibe aus Eisen angeordnet. Er unterscheidet bereits synchrone Motoren mit geringer Anzugskraft und Motoren mit grosser Anzugskraft. Im ersten Falle wird von der runden eisernen Ankerscheibe auf den Seiten je ein Teil abgeschnitten; überdies kann sie noch eine kurzgeschlossene Wicklung tragen. Die Bedeutung der vielpoligen Anordnung zur Ermässigung der Umlaufszahl erkannte TESLA früh, schon im Mai 1888 baute er vielpolige Motoren nach der Skizze Fig. 95. Zum Anlassen von asynchronen Wechselstrommotoren giebt TESLA das Schema Fig. 96. Er spaltet den Wechselstrom durch Widerstand $R$ und Selbstinduktion $L$ in zwei phasenverschobene Kreise, die in den Wicklungen $A$ $A$ $B$ $B$ ein Drehfeld erzeugen. Der rotierende Anker Fig. 96

1) NIKOLA TESLAS Untersuchungen über Mehrphasenströme: Th. C. MARTIN übersetzt von MASER.

zeigt auch die von TESLA angewandte Wicklung, nämlich zwei senkrecht aufeinanderstehende Spulen, die je auf sich kurz geschlossen sind. Er hatte damit eine bedeutende Steigerung des Momentes gegenüber einer reinen Eisenscheibe erzielt. Zur Reduktion des Leitungsmaterials verwendete TESLA für Zweiphasennetze e i n e gemeinsame Rückleitung. TESLA gab auch für einphasigen Wechselstrom Motorkonstruktionen an, die zwei parallelgeschaltete Wicklungen besassen, von denen die eine vermöge ihrer Disposition im Motor kleine Selbstinduktion und grossen Widerstand, die andere grosse Selbstinduktion und kleinen Widerstand hatte. Die gesamte lange Reihe von Patenten kaufte die Westinghouse Co. auf. Versuche aus dem Jahre 1888 an kleinen Teslamotoren ergaben Wirkungsgrade von 50 bis 60 %, aus dem Jahre 1889 schon von 90 % (10 PS und 385 kg Gewicht). Von TESLAS frühesten Untersuchungen auf dem Gebiete der Drehfeldmotoren sei noch erwähnt: Ein induktiver Regulator für Drehstrommotoren (eine in einem Wechselfeld drehbare Spule), ein durch magnetische Remanenz wirkender Motor, eine Methode

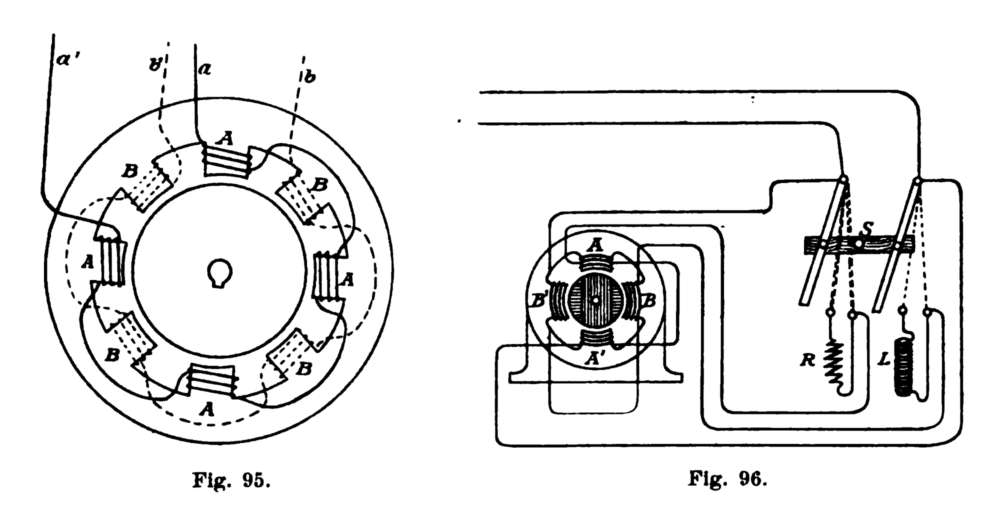



Fig. 95. Fig. 96.

zur Erzielung von Phasendifferenzen mittelst magnetischer Schirmwirkung, ein Motor mit einem Kondensator im Ankerkreis.

HASELWANDER aus Offenburg benutzte seine im Jahre 1887 erbaute Dreiphasenmaschine, die in dem Abschnitt „Historisches“ Band IV des Handbuches zu finden ist, auch zu Kraftübertragungszwecken, indem er eine dem Generator identische Maschine als Motor aufstellte, der völlig wie ein Gleichstrommotor gebaut war, aber über drei Schleifringe mit Drehstrom gespeist wurde. Vermittelst eines Kommutators erregte sich der Synchronmotor von selbst.

Von englischen Patenten auf Drehstrommotoren ist noch zu erwähnen No. 18525 aus dem Jahre 1889 von WILSON und No. 5423 aus dem Jahre 1890 von WENSTRÖM, der auf dem Gebiete der Mehrphasenstrompraxis ganz besondere Verdienste hat.

M. VON DOLIVO-DOBROWOLSKY hat zuerst den Ausdruck Drehstrom gebraucht. Im Jahre 1888 liess er sich den sogenannten Kurzschluss- oder Käfiganker patentieren, welcher aus einer Reihe Kupferstäbe besteht, die in den Anker eingebettet und an beiden Enden alle kurzgeschlossen sind. Im Jahre 1890 gab er an, wie die Anzugskraft von Drehstrommotoren

durch Einschalten von regulierbaren Widerständen in den Anker vergrössert wird. Der Drehstrommotor, der auf der Frankfurter Ausstellung im Jahre 1891 die von Lauffen übertragene Energie aufnahm und der von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft gebaut war, zeigte eine Ausführung, die der jetzt noch üblichen fast vollständig entspricht. Auf dieser Ausstellung wurden auch die nach Entwürfen von C. E. Brown gebauten Motoren der Maschinenfabrik Oerlikon vorgeführt.

## III. Synchronmotoren.

### a) Allgemeines.

§ 51. Wirkungsweise des Synchronmotors.

Bringt man einen Wechselstromgenerator $G_1$, gleichgültig ob einphasig oder mehrphasig auf synchrone Umdrehungszahl mit einer anderen Wechselstrommaschine $G_2$, die imstande ist Arbeit abzugeben und schaltet man die $G_1$ bei Phasengleichheit parallel zu $G_2$, so läuft die Maschine $G_1$, wenn die äussere Kraftzufuhr aufhört, als synchroner Motor weiter. Bezüglich des ganzen Aufbaues und auch bezüglich der Theorie kann deshalb im wesentlichen einfach auf den Abschnitt Wechselstromgeneratoren dieses Werkes[1]) verwiesen werden. Ein Synchronmotor besteht aus einer Wechselstromwicklung, die vom Netze gespeist wird und die feststehend oder drehbar angeordnet werden kann und aus einem gleichstromerregten Felde. Zur Speisung der Erregerwicklung kann eine besondere Gleichstromerregermaschine aufgestellt oder ein Teil des Wechselstromes kommutiert werden. Die meisten Firmen liefern ihre ein- und mehrphasigen Generatoren ohne irgend welche Änderung als Synchronmotoren. Ein Synchronmotor setzt sich als solcher nicht in Bewegung, da das resultierende Drehmoment, das auf einen drehbaren Anker ausgeübt wird, in welchen Wechsel- oder Drehstrom eingeleitet wird, Null ist, wenn er in einem aus abwechselnden Nord- und Südpolen bestehendem Felde steckt. Sobald der Anker sich synchron dreht, wechseln die Ankerströme ihr Zeichen dann, wenn der Anker in ein anderes Feld übertritt und es ist immer ein Drehmoment vorhanden, das mit der Stärke der Pole und derjenigen der Ankerströme zunimmt.

### b) Anlaufsvorrichtungen für Synchronmotoren.

§ 52. Hilfsmotor. Anlassen durch Gleichstrom.

Ein unverkennbarer Nachteil des Synchronmotors ist der, dass er nicht von selbst anläuft; er muss durch eine äussere Antriebskraft auf Synchronismus gebracht werden. Besonders bei einphasigen Motoren geschieht dies häufig vermittelst eines kleinen Induktionsmotors, der eine besondere Anlassvorrichtung besitzt und den Hauptmotor etwa durch ein Reibungsgetriebe antreibt. Es werden wohl auch Kommutatormotoren dazu verwendet, die gewöhnlich Serienwicklung tragen. Hat man eine Gleichstromquelle zur Ver-

1) Band IV.

fügung, so kann man die Erregermaschine zur Inbetriebsetzung benutzen. Handelt es sich um ein Umformer-Aggregat, das entweder aus Synchronmotor und Gleichstromdynamo besteht oder als rotierender Umformer[1]) ausgeführt ist, so sind wohl öfters Akkumulatoren vorhanden, so dass das Aggregat von diesen aus auf Touren gebracht wird, worauf die Wechsel-

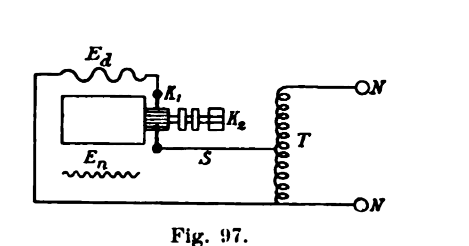


Fig. 97.

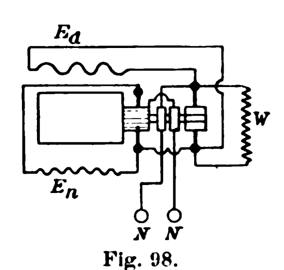


Fig. 98.

stromseite nach einer der Methoden, die beim Parallelschalten der Wechselstrommaschinen behandelt wurden[2]), ans Netz gelegt wird. Ein Beispiel hierfür bietet die Kraftübertragung der Stadt Kassel, die schon anfangs der 90er Jahre mit einem einphasigen Synchronmotor von 80 PS der Maschinenfabrik Oerlikon bewerkstelligt wurde. Die Sekundäranlage wird vermittelst Flüssigkeitsanlassers von den Akkumulatoren in Betrieb gesetzt (E. T. Z. 1893, p. 440).

§ 58. Vorrichtungen im Synchronmotor selbst.

Ist das ganze Gestell des Synchronmotors unterteilt, so kann er auch als Serienmotor (Fig. 97) in Betrieb genommen werden. In Fig. 97 ist zum Anlassen ($E_d$ = dicke Wicklung, $E_n$ = Nebenschlusswicklung, $K_1$ vielteiliger Kommutator für $E_n$, $K_2$ Kommutator für $E_d$ mit wenigen Segmenten, $S$ Schleifringe, $NN$ Netz) noch ein Reduktionstransformator $T$ zur Verminderung der Anlassspannung eingefügt. Die Arbeitsschaltung des Motors zeigt Fig. 98 ($W$ Widerstand zur Verminderung der Funkenbildung). In Fig. 99 ist eine ganz ähnliche Einrichtung (D. R. P. 103 004) gezeichnet, wobei zum Anlassen der Kommutator $B$ und die dicke Wicklung $H$ benutzt werden. Die Skizze entspricht bereits der Arbeitsschaltung, die insofern von Interesse ist, als der Synchronmotor wie in Fig. 98 compoundiert ist, um mit zunehmender Belastung die Erregung zu verstärken. Beim Anlassen sind die Bürsten auf dem Kommutator im allgemeinen um die Polteilung vorzuschieben, wenn ein kräftiges

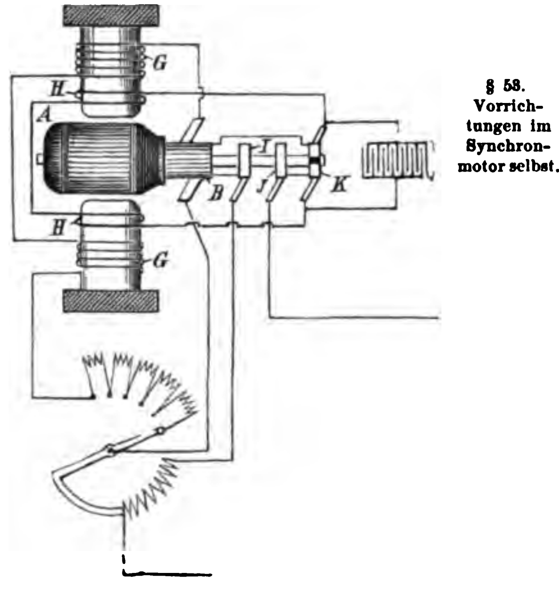


Fig. 99.

1) In dem Augenblick, in dem man die Wechselstromseite einschaltet, sollte die Gleichstromseite automatisch unterbrochen werden (El. World June 23, 1900).
2) Band IV.

Anzugsmoment bei geringer Funkenbildung erzielt werden soll. Die FORT WAYNE Co. kombiniert nach Fig. 100 einen Serienmotor für den Anlauf mit dem eigentlichen Synchronmotor: Beim Anlauf durchfliesst der Netzstrom den Anlasswiderstand $W$, die Erregerwicklung $E_h$, den Kollektor und die Ankerwicklung; bei normalem Betrieb liegt der Wechselstrom an den beiden Schleifringen 1 und 2, der Erregerstrom, der dem Kollektor entnommen wird, durchfliesst die Erregerwicklung $E_n$ und den Regulierwiderstand $W_n$; zwischen den Schleifringen 2 und 3 liegt eine Kontrolllampe.

Arbeitet ein Synchronmotor auf eine Transmission, in die noch von anderer Seite, z. B. von einer Dampfmaschine Arbeit eingeleitet wird, so wird der Synchronmotor von der Transmission in Betrieb genommen.

Handelt es sich nur um einen Motor und einen Generator, so lässt man beide kräftig erregt zusammen anlaufen und jede Hilfsvorrichtung wird entbehrlich.

Mehrphasige Synchronmotoren können unter Umständen mit geringer Last direkt in Betrieb gesetzt werden und zwar unerregt, d. h. bei offener oder kurzgeschlossener Erregerwicklung. Das Anlaufsmoment ist eine Wir-

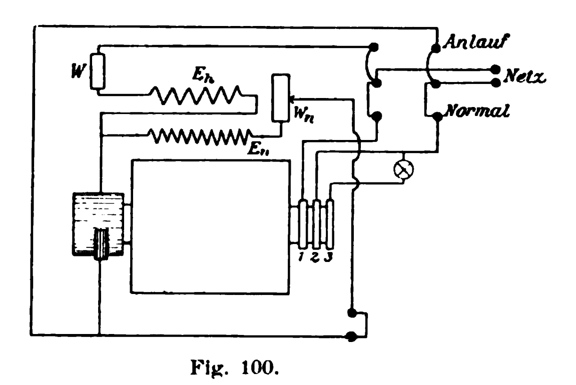



Fig. 100.

kung der Wirbelströme und der Hysteresis im Polgestell. Der Stromverbrauch beim Anlauf ist jedoch unverhältnismässig gross, mindestens zwei bis dreimal grösser als der normale, selbst wenn man die Anlaufspannung auf etwa die Hälfte reduziert. Beim Anlassen von Synchronmotoren von der Drehstromseite aus entstehen in der Erregerwicklung verhältnismässig hohe und lebensgefährliche Wechselspannungen und zwar um so bedeutendere, je grösser die Erregerwindungszahl, d. h. je höher die normale Erregerspannung ist. Falls man die Erregerwicklung beim Anlauf nicht kurzschliesst, ist es ratsam, dieselbe vor dem Anlaufen in eine Reihe kleiner Spulengruppen zu unterteilen, deren Verbindungen zunächst gelöst sind und die erst nach Erreichung einer gewissen Tourenzahl automatisch verbunden werden; die Einzelspannungen können sich dann nicht addieren und die Isolation wird weniger gefährdet. Bei einem selbsterregten rotierenden Einphasenumformer kann an der Gleichstromseite $\frac{+}{-}$ oder $\frac{-}{+}$ enstehen je nach dem Moment des Synchronismus. In Genf werden nach „Electrician“ zum Anlassen der „commutatrices“ von der E. A.-G. ALIOTH einspulige, stufenweise abschaltbare Anlasstransformatoren (Fig. 101) benutzt. Zum Anlauf liegen die beiden Umschalter in der punktierten Stellung. Das Primärnetz ist zweiphasig. Von den acht Schleifringen dienen vier als Reserve. Die Gleichstromseite

ist als Dreileiternetz ausgebildet. Den Synchronismus der Umformer erkennt man daran, dass die 250 Volt-Lampe nicht mehr auf- und ableuchtet. Es sind auch schon Hilfsmittel dahingehend verwendet worden, für den Anlauf den Luftzwischenraum, der normal so gross ist wie bei den entsprechenden Generatoren, zu verringern. Eine Kurzschlusswicklung in den Polschuhen, wie sie Hutin & Leblanc in ihren Alternatoren verwenden, erleichtert ebenfalls das Anfahren. Ein Überbrücken der Polschuhe an den Enden wirkt in

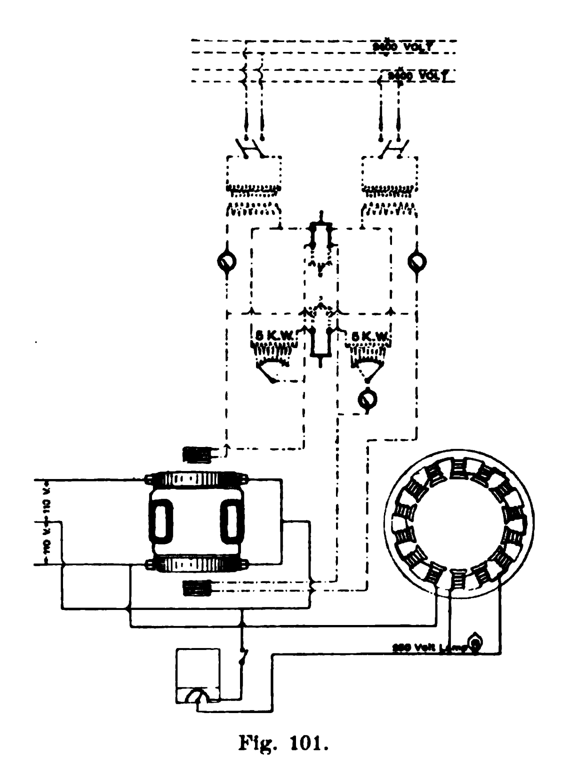



Fig. 101.

ähnlichem Sinne. Bei Verwendung von Brücken oder anderen Dämpfungsmitteln ist darauf zu achten, dass die durch Zähne und Nuten bedingten lokalen Kraftlinienänderungen nicht zu starke Wirbelströme erzeugen, welche die Maschine stark erwärmen und den Wirkungsgrad herabdrücken. (Teilweise geschlossene Nuten!)

Zur Dämpfung der Stromschwankungen in der Erregerwicklung empfiehlt es sich, einen Kondensator parallel zu derselben zu legen. Ein solcher wirkt zugleich synchronismuserhaltend.

## c) Allgemeine Theorie.

§ 54. Theorie auf Grund des Selbstinduktionskoeffizienten.

Ob eine Wechselstrommaschine, die an ein Netz angeschlossen ist, als Generator oder Motor läuft, hängt nicht von ihrer Tourenzahl ab, denn diese muss jedenfalls absolut synchron mit der Netzspannung sein, sondern von dem Phasenverhältnis der Netzspannung und der elektromotorischen Kraft, die im Maschinenanker induziert wird. Diese Verhältnisse lassen sich am einfachsten graphisch studieren, in gleicher Weise wie früher für die Generatoren.

Die Betrachtung sei zunächst unter Zugrundelegung eines gewissen Selbstinduktionskoeffizienten $L$ des Motors durchgeführt, der die Ankerrückwirkung einschliessen möge. Im Synchronmotor umgekehrt wie beim Generator verstärkt der nacheilende Strom das Feld, der voreilende schwächt es. Es sei nun $E_k$ die Klemmenspannung, $E$ die gegenelektromotorische Kraft des Synchronmotors, $L$ sein Selbstinduktionskoeffizient und $w$ sein Widerstand (bei Mehrphasenmotoren seien alle Grössen auf die Phase bezogen), $J$ der Anker-

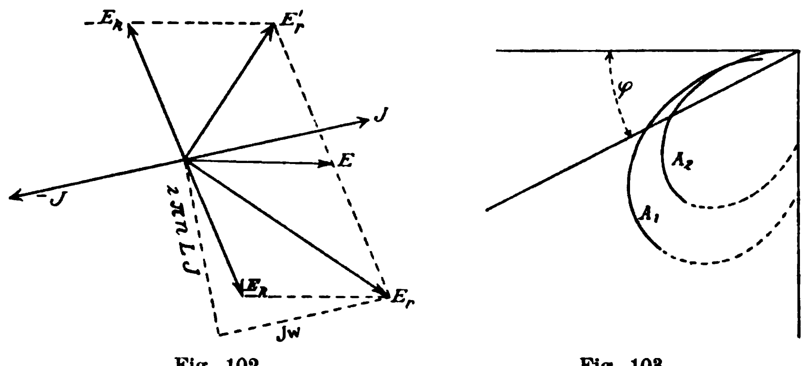



Fig. 102. Fig. 103.

strom, dann lassen sich die verschiedenen Grössen als Vektoren nach Fig. 102 kombinieren. Die vektorielle Differenz von $E_k$ und $E$ ist $E_r$, welche die Selbstinduktion $2\pi n L J$ und den Widerstand $Jw$ zu überwinden hat. $E_r$ lässt sich in die zwei genannten Komponenten zerlegen, wobei sich zugleich die Richtung und Grösse von $J$ ergiebt. Der dem Motor zugeführte Effekt ist pro Phase

$$A = E_k J \cos(E_k J) = E_k J \cos \varphi.$$

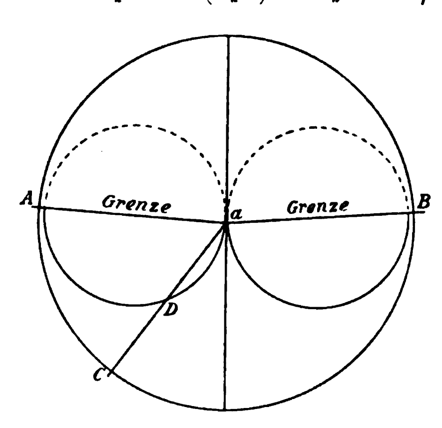



Fig. 104.

Man kann nun unter Beibehaltung aller Grössen bis auf $J$ in dem Diagramm den $\sphericalangle\, \varphi$ variieren und bekommt dann in Abhängigkeit von $\varphi$ den Strom und damit die Leistung $A$. In Polarkoordinaten giebt das nach Kapp die Kurven Fig. 103, wobei die kleinere $A_2$ einer geringeren Erregung, d. h. einem kleineren Wert von $E$ entspricht als die äussere Kurve $A_1$. Die Fahrstrahlen sind die Effekte in Watt. Die Leistung nimmt also mit zunehmendem $\varphi$ eine Zeitlang zu und erreicht ein Maximum, bei dem der Motor abfällt.

Es ist dies dieselbe Grenze, die auch bei parallelgeschalteten Maschinen beobachtet wird und die in Fig. 104 noch einmal aus Band IV wiedergegeben ist. Aus dem Diagramm lässt sich auch der cos $\varphi$ in Abhängigkeit der Leistung bestimmen, wobei sich nach KOLBEN die Kurven Fig. 105 ergeben, die einer bestimmten Erregung entsprechen. Endlich giebt die Schaukurve Fig. 106[1]) interessanten Einblick in die Arbeitsweise eines Synchronmotors;

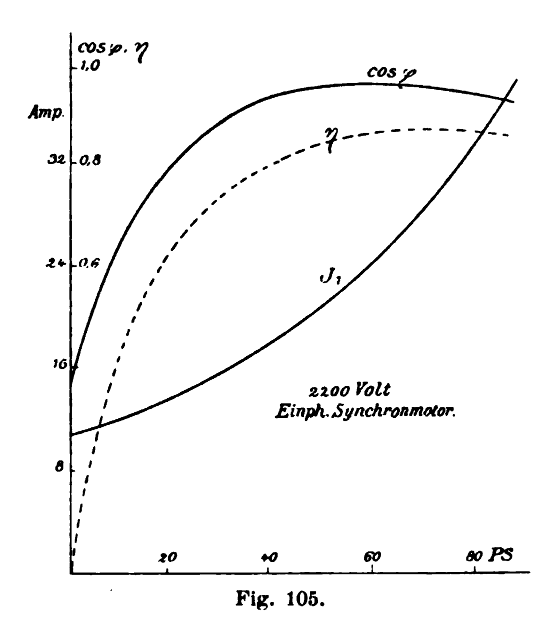



Fig. 105.

dieselbe erhält man, wenn man für eine bestimmte Leistung bei verschiedener Erregung, also variablem $E$, aber konstanter Klemmenspannung den Strom bestimmt, der den V-förmigen Verlauf Fig. 106 hat.[2]) Die cos $\varphi$-Kurve ist ebenfalls in Abhängigkeit des Stromes verzeichnet.[3]) Bei einer bestimmten

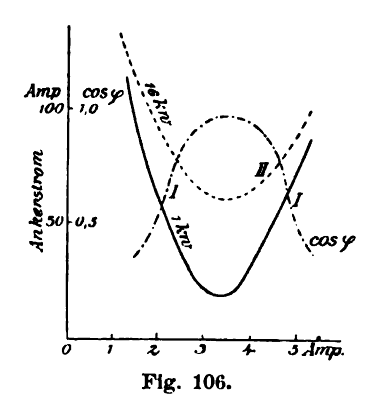



Fig. 106.

1) Band IV, p. 124.

2) Ist bei einem Einphasensynchronmotor von 50 Perioden Strom und Spannung phasenverschoben, so schwankt das Drehmoment in $^1/_{50}$ Sekunde zweimal von einem positiven zu einem negativen Maximum, weshalb sich ein kräftiges Schwungrad empfiehlt. Bei cos $\varphi$ = 1 ist das negative Maximum = Null. Bei Mehrphasenmotoren ist das Moment annähernd konstant.

3) Ausführliche Kurven für cos $\varphi$ bei verschiedenen Belastungen siehe das Werk „Electric Generators" von PARSHAL & HOBART, Abschnitt Rotary converters.

Erregung ist der Strom für eine gegebene Leistung ein Minimum und cos $\varphi$ angenähert 1. Für verschiedene Leistungen liegen die Kurven übereinander, Fig. 107 (nach Steinmetz); die Minima lassen sich durch die eingezeichnete Kurve verbinden. Der Synchronmotor kann allerdings thatsächlich nur gemäss den unteren Stücken der Kurvenschar Fig. 107 arbeiten, sobald die Kurven auf den beiden Seiten umbiegen, fällt der Motor ausser Tritt.

§ 55. Theorie auf Grund der Ampère-windungen.

Die besprochenen Kurven lassen sich noch unter einem anderen Gesichtspunkte entwickeln, nämlich unter dem der Ampèrewindungen, wobei man in der Regel den Einfluss des Ohmschen Widerstandes vernachlässigen kann. Der Klemmenspannung $E_k$ entspricht nämlich im Motor eine bestimmte Kraftlinienzahl[1]) $K$, zu deren Erzeugung eine Ampèrewindungszahl $AW_r$ erforderlich ist. Diese letztere muss die Resultante sein aus den Ampère-

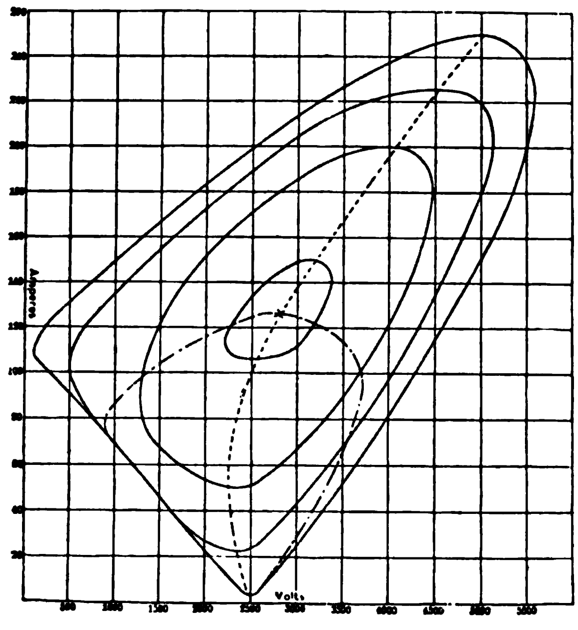


Fig. 107.

windungen $AW_f$ auf dem Felde und den Ankerampèrewindungen $AW_a$. $AW_a$ ist nach Band IV z. B. bei Dreiphasengeneratoren

$$2{,}12\, C \frac{JZ}{4p} \quad \text{. . . . . . . . . .} \quad (36)$$

wenn $Z$ die Leiterzahl pro Phase ist. Die V-Kurve konstruiert man nun folgendermassen aus Fig. 108. Man ermittelt aus der Leerlaufcharakteristik den zu $E_k$ gehörigen Wert von $AW_r$. Die $AW_r$, die Anker-$AW_a$ und die Feld-$AW_f$ bilden ein Dreieck, dessen Inhalt $AW_r \times AW_a \cos\varphi \cong E_k \cdot J \cos(E_k J)$ der zugeführten Leistung proportional ist. Man lässt also die Spitze $AW_f$ auf einer Parallelen zu $AW_r$ wandern und ermittelt die zusammengehörigen

1) Angenähert

$$E_k = cnZK \cdot 10^{-8}.$$

Werte von $AW_f$ und $AW_a$, aus denen sich der Erregerstrom und der Ankerstrom $J$ leicht berechnen. Man kann nun aber auch bei gegebener Erregung $AW_f$ und gegebener Klemmenspannung $E_k$, wozu eine bestimmte Grösse $AW_r$ gehört, die grösste Leistung, d. h. den Abfallswert des Synchronmotors ermitteln. Aus $AW_f$ und $AW_r$ lässt sich für verschiedene Winkel $\alpha$ die Grösse $AW_a$ bestimmen, wobei man die Spitze des Dreiecks auf einem Halbkreis wandern lässt. Aus $AW_a$ ermittelt sich, wie in (36) angedeutet, $J$; der $\sphericalangle\, \varphi = \sphericalangle\, (E_k J)$ ist gleich dem Winkel zwischen $AW_a$ und $AW_r$ minus $90^0$. $\cos\varphi = 1$ tritt ein, wenn der Motor so erregt ist, dass er als Generator bei Leerlauf eine elektromotorische Kraft liefert, die gleich der aufgedrückten EMK $E_k$ ist, d. h. wenn angenähert $AW_r = AW_f$.

Für konstantes $E_k$ ergeben sich aus Fig. 108 für jedes $AW_f$ eine Reihe Werte $J \cos\varphi$. Der Maximalwert $(J \cos\varphi)_{max}$ entspricht dem Abfallwert der zugeführten Leistung[1]) $E_k\,(J\cos\varphi)_{max}$. In gleicher Weise lässt sich für jede Erregung das $(J\cos\varphi)_{max}$ und damit der Abfallwert finden. Auch $E_k$, d. h. $AW_r$ kann variiert werden.

§ 56. Umformer.

Wird der Motor als Umformer[2]) benutzt, so ändert sich das Diagramm nach Fig. 109. Der Anker hat zwei Systeme von Ampèrewindungen, die

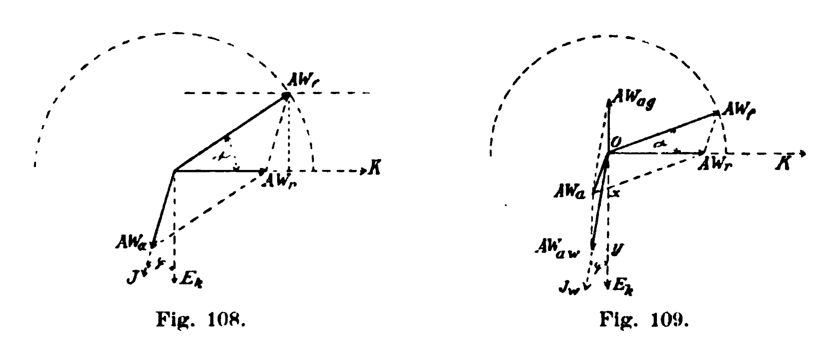


Fig. 108. Fig. 109.

sich teilweise aufheben, nämlich die (ein- oder mehrphasigen) Wechselstrom-$AW$: $AW_{aw}$ und die Gleichstrom-$AW$: $AW_{ag}$, die sich zu der Resultierenden $AW_a$ zusammensetzen. $AW_a$ kann man auch als die durch den Differenzstrom $J_g - J_w$ hervorgerufenen $AW$ betrachten ($J_g$ Gleichstrom, $J_w$ Wechselstrom). Das Verhältnis

$$\frac{AW'_{ag}}{AW'_{aw}\cos\varphi} = \zeta$$

ist für einen gegebenen Umformer konstant, aber es ist keinesfalls gleich 1, trotzdem von verschiedener Seite angegeben worden ist, dass in einem Umformer die Gleichstrom-$AW$ und die Wechselstrom-$AW$ bei $\cos\varphi = 1$ einander genau gleich sind.[3]) Das Verhältnis ist stets kleiner als 1 und zwar nicht nur, weil in $AW_{aw}$ auch die Ankerstreuung und der Leerstrom enthalten ist. Die Ermittelung des Wertes $J_w \cos\varphi$, der bei konstantem $E_k$ der zugeführten Leistung proportional ist, geschieht nun folgendermassen: $AW_r$ findet sich

1) Auf die Phase bezogen.

2) E. T. Z. 1900, p. 529.

3) Die Ankerrückwirkung äussert sich bei Umformern und $\cos\varphi < 1$ im wesentlichen als Gegen-$AW$, die Feldverzerrung bezw. Quermagnetisierung ist stets, auch bei $\cos\varphi = 1$ gering.

aus $K$ bezw. $E_k$: mit den eingestellten Erreger-$AW'_f$ wird ein Halbkreis beschrieben und bei verschiedenen $a$ der Wert $AW'_a$ nach Lage und Grösse bestimmt. Ziehe $AW_a x \parallel o AW_r$, mache $oy = \frac{ox}{1-\zeta}$, $y AW_{ow} \parallel AW_a x$, $OAW'_{ow} = xy$. Aus $OAW'_{ow}$ und dessen Lage findet sich der zuzuführende Wechselstrom $J_w \cos \varphi$ (Wattstrom) und aus einer Reihe Diagramme der Wert $(J_w \cos \varphi)_{max}$. Diese Grösse, die wieder den **Abfallwert** repräsentiert, ist bei dem Umformer für das gleiche Modell und für gleiche Erregung $AW'_f$ bedeutend grösser als für den gleichen Synchronmotor und **zwar um so grösser, je grösser die Phasenzahl.** Bei Dreiphasenumformern ist $\zeta = 0{,}6$ bis $0{,}7$, was sich in ähnlicher Weise theoretisch ermitteln lässt, wie die Thatsache, dass der Dreiphasenumformer 1,4mal soviel leistet wie dieselbe Maschine als Gleichstromdynamo, dieselbe Erwärmung vorausgesetzt.

Ist der auf die Gleichstromseite reduzierte[1] dreiphasige Drehstrom $J_w \cos \varphi$ und $1{,}4\,J_g$ der Gleichstrom bei Umformerbetrieb, so wird, wenn $J_g$ der Gleichstrom für die Verwendung als Gleichstromgenerator ist,

$$(J_w - 1{,}4\,J_g)^2 = J_g^2,$$

$$J_w = 2{,}4\,J_g,$$

d. h. man kann sich das Verhalten eines Umformers bezüglich Erwärmung und Ankerrückwirkung so vorstellen, als ob ein Strom $2{,}4\,J_g$ in ihn hineinfliesst und ein solcher von $1{,}4\,J_g$ herausfliesst, wobei sich also beide Ströme auf die Grösse $J_g$ neutralisieren.

Da die Windungszahl für beide Ströme die gleiche ist, so ist die Ankerrückwirkung der Drehstromseite proportional $2{,}4\,J_g$, diejenige der Gleichstromseite $1{,}4\,J_g$; ihre gegenseitige Richtung variiert mit $\cos \varphi$. Die beiden Werte verhalten sich wie $1 : 0{,}6$.

Für einen speziellen Fall ergab sich für die maximale Aufnahmsfähigkeit in Kilowatt (Abfallwerte):

| $J_e$ | Synchronmotor | Umformer bei $AW'_{aw} : \frac{AW'_{ag}}{\cos \varphi} = 1 : 0{,}6$ | Umformer bei $AW'_{aw} : \frac{AW'_{ag}}{\cos \varphi} = 1 : 0{,}9$ |
|---|---|---|---|
| | KW | KW | KW |
| 1 | 13 | 43 | 120 |
| 3 | 40 | 120 | 400 |
| 5 | 80 | 260 | 770 |

$J_e$ Erregerstrom, das Verhältnis 1 : 0,9 ist nur vergleichsweise angenommen, es entspricht nicht der Wirklichkeit.

Bei verschiedener Luft bleiben die Werte angenähert dieselben, diese Maxima treten nur bei anderem $\cos \varphi$ auf; z. B. bei $J_e = 1$ tritt der Maximalwert der aufgenommenen Leistung für $\cos \varphi = 0{,}36$ bei 1,5 mm Luft, für

[1] Von Verlusten abgesehen.

cos $\varphi = 0,29$ bei 2,5 mm Luft ein, Arbeitsweise als Synchronmotor vorausgesetzt. Bei $J_n = 5$ gilt für den Synchronmotor bei maximaler Arbeitsaufnahme cos $\varphi = 0,90$ für 1,5 mm Luft, cos $\varphi = 0,84$ bei 3,5 mm Luft (nacheilender Strom). In gleicher Weise ist auch für die Arbeitsweise als Umformer cos $\varphi$ für kleinere Luft grösser als für grössere, ein Fingerzeig, mit der Luft bei Synchronmotoren und Umformern nicht allzuhoch zu gehen, im Gegensatz zu dem, was vielfach angenommen wird.

§ 57. Phasenumformer.

Dass ein Synchronmotor als Umformer von Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom bei drei Phasen und bei gleicher Erwärmung wie als Gleichstromdynamo etwa 35 % mehr leistet als diese, bei sechs Phasen etwa 100 % mehr, bei zwei Phasen etwa 65 % mehr und bei einer Phase etwa 10 % weniger, sind allgemein bekannte Thatsachen. R. W. Quick[1]) hat das Verhalten von Synchronmotoren studiert, wenn sie als Phasenumformer benutzt werden. Falls $\varepsilon$ der Phasenwinkel ist, um den ein Anschluss der einen Umformerseite gegen den der anderen versetzt ist, findet er für cos $\varphi = 1$ (primär und sekundär):

| | Gleichstrom | Einphasig in Dreiphasig | | Einphasig in Zweiphasig | | Dreiphasig in Zweiphasig | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\varepsilon$ | | $\varepsilon$ | | $\varepsilon$ | |
| Mittlerer Kupfer- | 1 | 30° | 1.645 | 45° | 1.586 | 15° | 0.584 |
| verlust | | 0° | 1.408 | 0° | 1.000 | 0° | 0.527 |
| Maximaler Verlust | 1 | 30° | 4.725 | 45° | 3.000 | 15° | 2.185 |
| pro Leiter | | 0° | 3.185 | 0° | 1.000 | 0° | 1.621 |
| Minimaler Verlust | 1 | 30° | 0.105 | 45° | 0.172 | 15° | 0.008 |
| pro Leiter | | 0° | 0.519 | 0° | 1.000 | 0° | 0.082 |

Die Verluste verteilen sich also sehr ungleichmässig auf den Umfang. Bei Phasenverschiebungen primär oder sekundär werden die Verluste noch grösser.

## d) Analytische Theorie.

§ 58. Theorie nach Ossanna.

Analytisch lassen sich die Betriebsverhältnisse eines Synchronmotors in Anlehnung an die Theorie von G. Ossana, E. T. Z. 1896, folgendermassen fassen: $E_1$ sei die EMK des stromliefernden Generators, $E_2$ diejenige des Motors, $E$ ihre Resultante, $J$ die Stromstärke, $w_1 + w_2 = w$ die Summe der Widerstände von Generator, Linie und Motor, $L_1 + L_2 = L$ die entsprechenden Selbstinduktionskoeffizienten, tg $\varphi = \frac{2\pi n L}{w}$, $2\pi n = \omega$, $A'$ der vom Generator abgegebene elektrische Effekt, $A$ der vom Motor aufgenommene Effekt; dann ergeben sich folgende Ausdrücke:

$$A' = J E_1 \cos (J E_1) = \frac{1}{w} \left[ E_1^2 \cos \varphi - E_1 E_2 \cos \varphi \cos (\varphi + \alpha) \right] \quad . \quad . \quad (37)$$

1) El. World Vol. XXXV, p. 14, 1900.

$$A = J E_2 \cos (J E_2) = \frac{1}{w} \left[ E_1 E_2 \cos \varphi \cos (\varphi - \alpha) - E_2^2 \cos^2 \varphi \right] \quad . \quad (38)$$

$$J = \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 - 2 E_1 E_2 \cos \alpha}{w^2 + \omega^2 L^2}} \quad \ldots \ldots \quad (39)$$

wobei $(180 - \alpha)$ der Winkel zwischen $E_1$ und $E_2$ ist.

Der elektrische Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{A}{A'},$$

ist

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{E_1 \cos (\varphi - \alpha) - E_2 \cos \varphi}{E_1 \cos \varphi - E_2 \cos (\varphi + \alpha)} \quad \ldots \ldots \quad (40)$$

Derselbe wird ein Maximum, wenn $J$ ein Minimum, also $= J_{min}$ wird, was eintritt für $\cos (J E_1) = 1$ und zwar

$$J_{min} = \frac{1}{2 w} \left[ E_1 - \sqrt{E_1^2 - 4 w A} \right] \quad \ldots \ldots \quad (41)$$

wenn $A$ der zu übertragende Effekt ist.

Dabei ist

$$E_2 = \sqrt{(E_1 - J_{min} w)^2 + \omega^2 L^2 J_{min}^2} \quad \ldots \ldots \quad (42)$$

§ 59. Überlastungsfähigkeit.

Die Überlastungsfähigkeit $U$ eines Motors ist das Verhältnis der maximal-möglichen Arbeit $A_{max}$, die überhaupt übertragen werden kann, ehe der Motor abfällt und der normalen $A_0$, nun ist aber

$$A_0 = J_{min} (E_1 - J_{min} w) \quad \ldots \ldots \quad (43)$$

$$A_{max} = \frac{E_2 \cos \varphi}{w} (E_1 - E_2 \cos \varphi), \quad \ldots \ldots \quad (44)$$

also

$$U = \frac{A_{max}}{A_0} = \frac{E_2 \cos \varphi (E_1 - E_2 \cos \varphi)}{w \cdot J_{min} (E_1 - J_{min} w)} \quad \ldots \ldots \quad (45)$$

$$U = \frac{w}{\frac{E_1}{J_{min}} - w} \sqrt{\frac{\left(\frac{E_1}{J_{min}} - w\right)^2 + \omega^2 L^2}{w^2 + \omega^2 L^2}} \left[ \frac{E_1}{w J_{min}} - \sqrt{\frac{\left(\frac{E_1}{J_{min}} - w\right)^2 + \omega^2 L^2}{w^2 + \omega^2 L^2}} \right] \quad (46)$$

Bei gegebenem $w$ wird dieser Ausdruck ein Maximum, wenn

$$\omega L = w \sqrt{\frac{4 (E_1 - J_{min} w)^2 - E_1^2}{E_1^2 - 4 w^2 J_{min}^2}} \quad \ldots \ldots \quad (47)$$

und zwar

$$U_{max} = \left(\frac{E_1}{J_{min}}\right)^2 \frac{1}{4 w \left(\frac{E_1}{J_{min}} - w\right)} \quad \ldots \ldots \quad (48)$$

Zur Vergrösserung des Überlastungsfaktors $U$ giebt es verschiedene Wege, er wächst mit der Klemmenspannung $E_1$. Der maximale Effekt $A_{max}$



verläuft in Abhängigkeit von $E_1$ nach Fig. 110. Natürlich ist bei einem gegebenen Motor durch die Eisensättigung und die Erwärmung der beliebigen Vergrösserung von $E_1$ eine Schranke gezogen. Eine Steigerung von $E_2$ hat nur bis zu einer gewissen Grenze eine Steigerung von $A_{max}$ zur Folge. Die gegenseitige Abhängigkeit ist in Fig. 111 niedergelegt. In Fig. 112 und 113

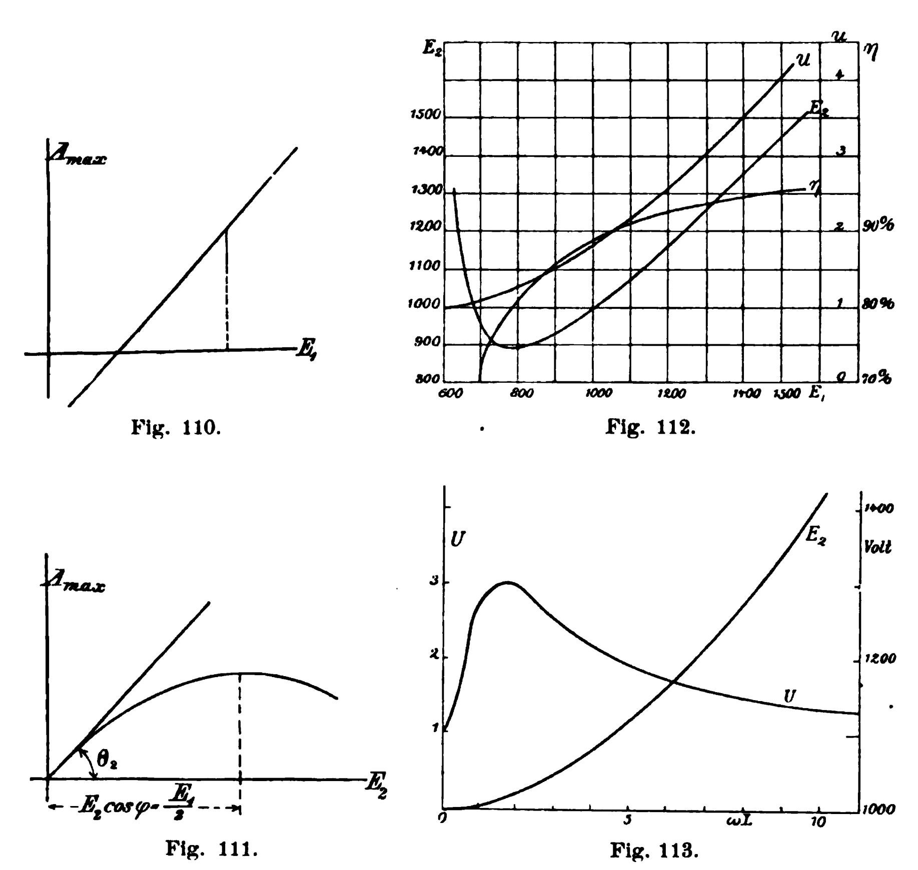



Fig. 110. Fig. 112.

Fig. 111. Fig. 113.

ist ein Beispiel der Betriebsverhältnisse für einen Synchronmotor graphisch wiedergegeben. Für verschiedene Klemmenspannungen $E_1$ ist in Fig. 112 die gegenelektromotorische Kraft $E_2$ für cos $\varphi = 1$, d. h. für $J_{min}$, der Überlastungsfaktor $U$ und der Wirkungsgrad $\eta$ verzeichnet; in Fig. 113 ist $E_2$ und $U$ in Abhängigkeit von der Selbstinduktion $\omega L$ gegeben.

## e) Verschiedene Betriebsverhältnisse.

Steinmetz giebt in seinem Werke „Alternating Current Phenomena" auf Grund eines Diagrammes wie Fig. 102 bezw. 108 die Theorie des Synchronmotors in graphischer und analytischer Lösung und zwar betrachtet er immer einen Wechselstromgenerator, der auf einen Synchronmotor arbeitet. Die Klemmenspannung des Motors ist $E_k$, die elektromotorische Gegenkraft $E$, die für die Impedanz

$$\mathfrak{z} = \sqrt{w^2 + x^2} = \sqrt{w^2 + (2\pi n L)^2}$$

im Motor benötigte Potentialdifferenz sei $E_r$. Es werden nun einige besondere Fälle betrachtet:

§ 60. Variable Erregung.

1) $E_k$ und Stromstärke $J$ sind konstant, $E$, d. h. die Motorerregung wird variiert. Zu diesem Zwecke wird eine beliebige Achse $J$ (Fig. 114) gezogen, an dieselbe unter dem Winkel $\varphi$ ein Strahl gelegt, so dass

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2 \pi n L}{w}, \quad OA = E_r.$$

Um $O$ und $A$ wird je ein Kreis mit $E_k$ gezogen. Die Strecken $O1$, $O2 \ldots O12$ stellen Lage und Grösse von $E_k$ dar, die Strecken $O1' \ldots O12'$ Lage und Grösse von $E$, die zu den gleichnamigen Werten von $E_k$ gehören. Die jeweilige zugeführte Leistung des Motors ist $Op_1 \times J$, $Op_2 \times J \ldots Op_{12} \times J$, wobei $J$ konstant ist.[1]) Der kleinste Wert von $E$ ist $O1'$, für welchen Wert die Leistung $Op_1 \times J$ schon bedeutend ist. $E$ steigt dann auf $O2'$ u. s. w., die Leistung steigt ebenfalls, erreicht ihr Maximum bei $3'$, wo $E_k$ und $J$ in

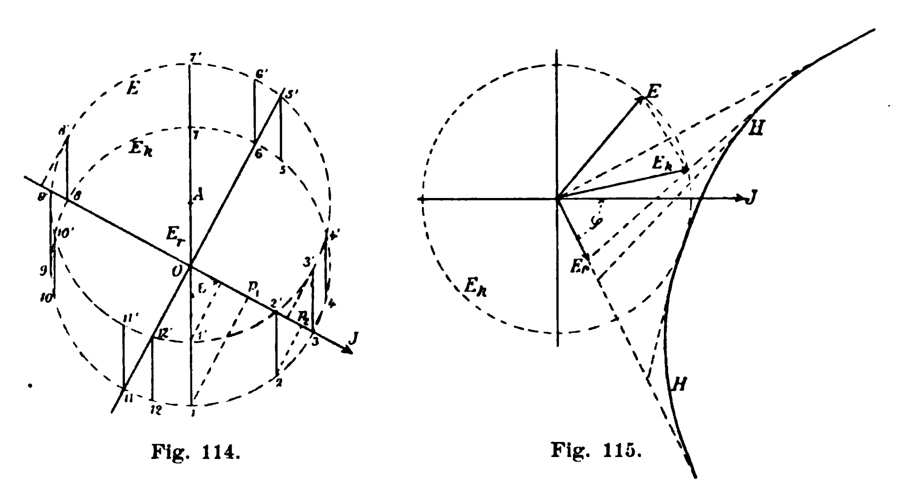



Fig. 114. Fig. 115.

Phase sind; $E$ steigt immer weiter, während die Leistung wieder fällt. Bei $4'$ ist $E = E_k$, bei $5'$ geht die Leistung durch Null, der Motor wird nun Dynamo, während das Netz $E_k$ ebenfalls Strom liefert; es sind also beide Maschinen Generatoren. Bei 6 wird die Leistung der Klemmenspannung 0 und von da ab ist nur der Motor Generator, der Generator aber Motor. Bei $7'$ 7 erreicht $E$ sein Maximum, dann nimmt $E$ wieder ab, während die Leistung bis 8 $8'$ zunimmt. Bei $11'$ 11 wird die Leistung von $E_k$ Null und der ursprüngliche Generator wird wieder Generator. Beide Maschinen sind nun bis $12'$ 12 Generatoren, wo die Leistung von $E$ Null und der ursprüngliche Motor wieder Motor wird. $E$ nimmt nun bei zunehmender Leistung bis $1'$ 1 ab. Bei den kleinen Werten von $E$ eilt der Strom nach und zwar bis 2 der elektromotorischen Kraft $E$ und bis 3 der Klemmenspannung $E_k$. Es ist darauf aufmerksam zu machen, dass bei dem kleinsten Wert von $E$, nämlich $O1'$ die Leistung $Op_1 \cdot J$ ist. Der Motor kann also nur bei einer dieser Grösse entsprechenden Belastung laufen. Ist diese nicht vorhanden, so nimmt

---

1) $p_1 \ldots p_{12}$ sind die Fusspunkte der Projektionslote der Punkte 1 ... 12 auf $OJ$.

der Strom solange zu, bis Gleichgewichtszustand vorhanden ist. In diesem Falle steigert also eine Belastungsreduktion den Strom. Bei 3 erreicht der Motor nicht nur die maximale Leistung ($\sphericalangle JE_k = 0$), sondern auch den maximalen Wirkungsgrad.

§ 61. $J$ variabel.

2) $E_k$, $E$ konstant, $J$ variabel. Nach Fig. 115 liegt $E_k$ auf dem Kreis $E_k$.

$$E_r = \sqrt{(wJ)^2 + (2\pi n L J)^2}$$

liegt auf einer Geraden unter dem $\sphericalangle \varphi$, wobei

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi n L}{w}.$$

Alle Linien $E_r E_k$ hüllen eine Kurve ein, derart, dass alle Strahlen $E_r E_k H$ in $E$ halbiert werden. Es ist diese Hüllkurve eine Kurve sechster Ordnung. Fig. 115 stellt den Fall dar, dass $E_k = E$ ist.

Im Falle $E = E_k$ eilt zunächst bei kleinem $J$ der Strom der Klemmenspannung $E_k$ voraus, dann tritt Phasengleichheit ein und bei grossen Werten von $J$ eilt der Strom nach. Der kleinste Strom ist Null, der grösstmögliche

$$\frac{2E_k}{\mathfrak{z}} = \frac{2E_k}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}}.$$

Im Falle, dass $E < E_k$, kann der Strom nie Null werden, der kleinste Strom ist

$$\frac{E_k - E}{\mathfrak{z}}$$

und der maximalmögliche

$$\frac{E_k + E}{\mathfrak{z}}.$$

$J$ eilt stets der Spannung $E_k$ nach.

Im Fall, dass $E > E_k$, ist der kleinste Strom

$$\frac{E - E_k}{\mathfrak{z}},$$

der grösste

$$\frac{E + E_k}{\mathfrak{z}}.$$

Bei den kleinen Stromwerten ist jedoch der Motor ein Generator. Er wird erst an der Stelle Motor, wo eine vertikale Tangente die entsprechende Hüllkurve $H$ berührt. Aus den angegebenen Maximalstromwerten ist zu ersehen, dass der Motor im dritten Falle ($E > E_k$) z. B. mehr als zweimal soviel Strom aufnehmen kann als bei Stillstand, wobei

$$J = \frac{E_k}{\mathfrak{z}}$$

ist.

In Fig. 116 ist allerdings auf Grund des Diagrammes Fig. 108 vom Verfasser dieses Verhalten klargelegt. In Abhängigkeit vom Strome $J$ ist für $E_k = 78$ Volt einmal bei $E = 100$, dann bei $E = 50$ die Leistung $A_{100} = c_{100}\, J \cos \varphi'$ und $A_{50} = c_{50}\, J \cos \varphi'$ und dann der $\cos \varphi'_{100}$ und $\cos \varphi'_{50}$

dargestellt; $+\varphi'$ bedeutet Voreilung, $-\varphi'$ Nacheilung. $c_{100} = 2\,c_{50}$ und $A_{max}$ bei 50 Volt[1]):

$$A_{max} = 113 \cdot 78 \cdot 3 = 26{,}5\,KW, \text{ bei 100 Volt: } A_{max} = 2 \cdot 115 \cdot 78 \cdot 3 = 54\,KW.$$

§ 62. Maxim. Wirkungsgrad.

3) Als Bedingung für den **maximalen Wirkungsgrad** $\eta$ bei konstantem $E_k$ erhält man, dass die Phasenverschiebung $(E_k\,J)$ stets Null sein muss.

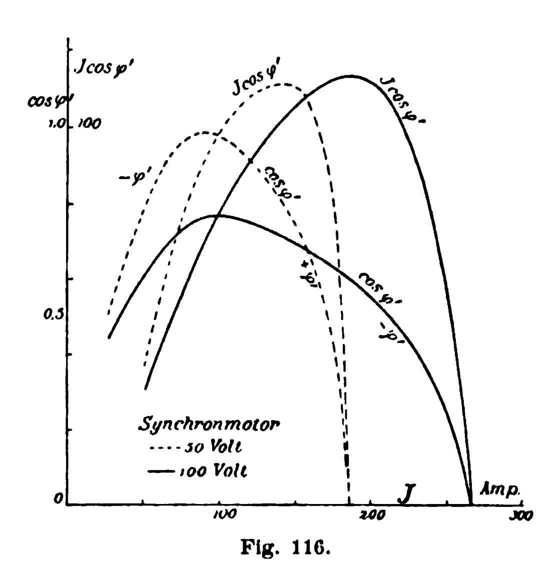



Fig. 116.

Die Diagonale $E_k$ (Fig. 117) des Parallelogrammes mit den Seiten $E$ und $E_r$ muss also immer auf dem Stromvektor liegen und das Ende von $E_r$ auf einem Strahl unter dem $\sphericalangle\,\varphi = \sphericalangle\,E_k\,O\,E_r$, so dass

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2\pi n L}{w},$$

wobei stets die Strecke

$$O\,E_r = E_k\,E = J\sqrt{4\pi^2 n^2 L^2 + w^2}.$$

Die Leistung wird bei maximalem $\eta$ ein Maximum, wenn $E\,O = E\,E_k$, dann ist die Leistung

$$= \frac{E_k^2}{4w} \text{ und } \eta = 50\,\%.$$

Der Wert von $E$, d. h. $E'$ ist in diesem Falle

$$E' = \frac{\mathfrak{z}}{w} \cdot \frac{E_k}{2} = \frac{E_k}{2}\sqrt{1 + \left(\frac{x}{w}\right)^2} \quad \dots\dots \quad (49)$$

Allgemein gilt für die Bedingung maximalen Wirkungsgrades

$$E = \sqrt{(E_k - J w)^2 + J^2 x^2} \quad \dots\dots \quad (50)$$

---

1) $\varphi'$ ist der Winkel zwischen $E_k$ und $J$; $A_{max}$ die zugeführte Leistung. In Fig. 116 ausgezogene Kurve $J \cos\varphi'$ in halbem Massstab aufgezeichnet.

Es sei noch erwähnt, dass der Verlauf von $E$ bei maximalem $\eta$ folgender ist: Bei $J = 0$ ist $E = E_k$, dann nimmt $E$ ab bis $E_{min}$ und steigt dann wieder und es wird noch einmal $E = E_k$, dann steigt $E$ fortwährend.

§ 63. Grenzwerte von $E$ und $J$.

4) Das Diagramm ergiebt in einfacher Weise, dass ein Synchronmotor eine Leistung $A'$ bei gegebener Klemmenspannung mit demselben Strom entweder voreilend oder nacheilend aufnehmen kann; die beiden zugehörigen Werte von $E$ sind natürlich sehr verschieden. Obwohl diese Thatsache am augenfälligsten aus den V-Kurven (Fig. 107) hervorgeht, sei hier ein Beispiel herangezogen und zwar soll ein Synchronmotor bei 1000 Volt verschiedene Leistungen $A'$ aufnehmen, was er bei bestimmt festgelegten Werten von $w$ und $2\pi n L$ nur kann, wenn

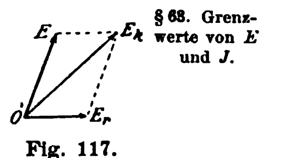


Fig. 117.

| $A'$ Watt | $E$ Volt | | $J$ Ampère | |
|---|---|---|---|---|
| | $>$ | $<$ | $>$ | $<$ |
| 1000 | 46 | 2200 | 1 | 49 |
| 6000 | 340 | 1920 | 7 | 43 |
| 9000 | 540 | 1750 | 11,8 | 38,2 |
| 12000 | 920 | 1320 | 20 | 30 |

§ 64. Anal. Theorie von Steinmetz.

Aus der **analytischen** Theorie des Synchronmotors von STEINMETZ sind ebenfalls noch einige Punkte bemerkenswert. Aus dem Diagramm ist direkt abzulesen

$$E_k^2 = E^2 + E_r^2 + 2\, E \cdot E_r \cos (E E_r) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

Durch Umformung ergiebt sich als Fundamentalgleichung

$$E_k^2 - E^2 - \mathfrak{z}^2 J^2 - 2\, w A = 2\, x \sqrt{J^2 E_k^2 - A^2} \quad . \quad . \quad (52)$$

worin $A$ die vom Motor abgegebene Leistung (inklusive Lager- und magnetische Reibung ist).

Durch weitere Umformung bringt er die Gleichung auf die Form

$$\left\{w^2 (E^2 + \mathfrak{z}^2 J^2) - \mathfrak{z}^2 (E_k^2 - 2\, w A)\right\}^2 + \left\{w x\, (E_k^2 - \mathfrak{z}^2 J^2)\right\}^2$$
$$= s^2 \mathfrak{z}^2 E_k^2\, (E_k^2 - 4\, w A) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

Dabei ist

$$s = \mathfrak{z} \sqrt{1 - \varepsilon^2}, \quad \varepsilon = \frac{w}{\mathfrak{z}}.$$

Für den Gebrauch lässt sich noch eine bequemere Form finden, nämlich eine Auflösung nach $E$ und $J$ unter Benutzung eines Winkelparameters $\psi$, der keine bestimmte physikalische Bedeutung hat:

$$\left.\begin{aligned} E &= \frac{E_k \mathfrak{z}}{w} \sqrt{\frac{1}{2}\left\{\left(1 - \frac{2\, w A}{E_k^2}\right) + \left(\frac{x}{\mathfrak{z}} \cos \psi + \frac{w}{\mathfrak{z}} \sin \psi\right) \sqrt{1 - \frac{4\, w A}{E_k^2}}\right\}} \\ J &= \frac{E_k}{w} \sqrt{\frac{1}{2}\left\{\left(1 - \frac{2\, w A}{E_k^2}\right) + \left(\frac{x}{\mathfrak{z}} \cos \psi + \frac{w}{\mathfrak{z}} \sin \psi\right) \sqrt{1 - \frac{4\, w A}{E_k^2}}\right\}} \end{aligned}\right\} \quad (54)$$

Diese beiden Gleichungen stellen die charakteristischen Leistungskurven des Synchronmotors dar und sind vierter Ordnung; man kann $\psi$ alle möglichen Werte geben.

Aus den Gleichungen folgt verschiedenes:

1) Maximalleistung

$$A_{max} = \frac{E_k^2}{4\,w} \text{ bei } E = \frac{\mathfrak{z}}{2\,w}\,E_k\,,\; J = \frac{E_k}{2\,w}$$

und dabei

$$\cos\,(E\,J) = \frac{w}{\mathfrak{z}}$$

und

$$\cos\,(E_k\,J) = 1.$$

2) Die theoretischen **Leerlauf**werte (allerdings abgesehen von Reibung u. s. w.) sind

$$\left.\begin{aligned} E &= \frac{E_k\,\mathfrak{z}}{w}\sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{x}{\mathfrak{z}}\cos\psi + \frac{\mathfrak{z}}{w}\sin\psi\right)} \\ J &= \frac{E_k}{w}\sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{x}{\mathfrak{z}}\cos\psi - \frac{\mathfrak{z}}{w}\sin\psi\right)} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad (55)$$

Das Minimum von $E$ ist $E = 0$ bei $J = \frac{E_k}{\mathfrak{z}}$.

" " " $J$ " $J = 0$ " $E = E_k$.

" Maximum " $E$ " $E = \mp E_k \frac{\mathfrak{z}}{w}$ bei $J = E_k \frac{x}{w\,\mathfrak{z}}$.

" " " $J$ " $J = \frac{E_k}{w}$ bei $E = \mp E_k \frac{x}{w}$.

3) **Minimum an Strom** bei gegebener Leistung $A$.

Für $\sphericalangle\,(E_k\,J) = 0$ findet sich

$$E = \sqrt{(E_k - J\,w)^2 + J^2 x^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (56)$$

4) **Maximale Phasenverschiebung** bei

$$J = \sqrt{\frac{A}{w}}$$

bei

$$\eta = 50\,\%.$$

Für die maximale Phasenverschiebung gilt ferner

$$(E_k^2 - E^2)^2 + J^4\,\mathfrak{z}^2\,(\mathfrak{z}^2 + 8\,w^2) + 2\,J^2\,E^2\,(5\,w^2 - \mathfrak{z}^2) - 2\,J^2\,E_k^2\,(\mathfrak{z}^2 + 3\,w^2) = 0.$$

Bei der Benutzung obiger Entwickelungen ist zu beachten, dass $E$ sich nicht unbeschränkt steigern lässt, da deren Wert durch die magnetische Sättigung begrenzt wird. Die Reaktanz $2\,\pi\,n\,L = x$ ist nicht konstant, sondern ändert sich mit der magnetischen Induktion.

## f) Vergleich des Synchronmotors mit anderen Motorgattungen.

§ 65. Vor- und Nachteile des Synchronmotors.

Der Synchronmotor hat anderen Wechselstrommotoren gegenüber den Vorteil, dass er absolut konstante Tourenzahl bei allen Belastungen beibehält, sofern er mit gleichbleibender Cykelzahl gespeist wird. Sein Wirkungsgrad, sein cos $\varphi$ und seine Überlastungsfähigkeit sind mindestens so gut bezw. meist besser als bei anderen Motorgattungen, der cos $\varphi$ kann jederzeit der Einheit sehr nahe gleich gemacht werden, wenn nötig kann er sogar Phasenvoreilung erzeugen. Nachteile des Synchronmotors sind jedoch das geringe Anzugsmoment und die Notwendigkeit einer Gleichstromerregung. Für kleine Leistungen ist deshalb ein Synchronmotor meist ein Unding. Bei sehr starken Überlastungen, z. B. auch bei Blitzschlägen fällt der Synchronmotor ausser Tritt und läuft dann nicht wieder von selbst an. Ein Verbrennen des Motors durch übermässige Stromzufuhr ist in der Regel der Selbstinduktion halber nicht zu fürchten. Er ist deshalb im wesentlichen für Transmissionsantriebe zu empfehlen, wobei er möglichst dauernd im Betrieb gehalten wird. Beim Parallelarbeiten verschiedener Synchronmotoren oder auch beim Arbeiten eines Synchronmotors auf eine Transmissionswelle, auf die schon ein anderer Arbeitsmotor arbeitet, z. B. ein Gasmotor, aber auch allgemein bei Synchronmotoren, welche von Alternatoren, deren Antrieb durch Kurbelmaschine erfolgt, betrieben werden, treten Pendelungen und ähnliche Erscheinungen auf wie bei parallelgeschalteten Generatoren, weshalb sich für die Konstruktion der Synchronmotoren in dieser Hinsicht die gleichen Gesichtspunkte ergeben, die in Band IV niedergelegt sind, z. B. Verwendung schwerer Schwungräder oder von elektrischen Dämpfern oder von Drosselspulen.[1]) Besonders bei einphasigen Synchronmotoren sind Schwankungen leicht möglich, da bei phasenverschobenem Strom der Motor periodenweise sogar Arbeit ins Netz zurückschickt, d. h. das Drehmoment variiert pro Cykel zwischen einem hohen positiven Wert und einem kleinen negativen hin und her.

Eine elektrische Tourenregulierung des Synchronmotors ist so gut wie ausgeschlossen. Ein Synchronmotor, der mit einem anderen Antriebsmotor auf dasselbe Getriebe arbeitet, kann bei unterbrochener Centrale ins Netz zurückarbeiten, was unangenehme Folgen haben kann.

Bezüglich der Berechnung der EMK, der Streuung, der Ankerrückwirkung, der Verluste, des Wirkungsgrades sowie bezüglich der konstruktiven Anordnung und betreffs Beispiele sei auf Band IV sowie auf Späteres verwiesen.

---

1) Bei Verwendung des Synchronmotors als Umformer sollte nach STEINMETZ (El. World 1900) die Schwungmasse $GD^2$ klein sein, da sonst Pendeln und Funkenbildung zu fürchten ist. Grosse Ankerreaktion ist für Umformer günstig. Sechsphasenumformer sollen weniger zu pendeln neigen als solche von geringerer Phasenzahl. In Amerika wird offenbar gegen Pendeln hin und wieder ein antihunting device verwendet, das in einem Schwungrad besteht, welches mit der Maschinenachse durch eine federnde Kupplung verbunden ist. Synchronmotoren, die als Umformer arbeiten, versieht man häufig mit einer Hauptstrom-Erregerwicklung (Gleichstrom); die entweder additiv oder differentiell gewickelt ist. Erstere Compoundierung hat den Zweck, vermittelst der in der Wechselstromleitung liegenden Selbstinduktion (Transformatoren, Drosselspulen u. s. w.) und mit Hilfe der Übererregung die Spannung bei Belastung konstant zu halten bezw. mit der Belastung zu steigern. Eine negative Compoundierung wird dann benutzt, wenn parallel zur Gleichstromseite eine Akkumulatorenbatterie liegt und deren Pufferwirkung erhöht werden soll. Diese Compoundierung kann allerdings durch eine differentiell erregte Zusatzmaschine in der Batterieleitung ersetzt werden.

Die meisten Firmen liefern ihre Wechsel- und Drehstromgeneratoren[1]) in gleichbleibender Ausführung auch als Synchronmotoren, wobei die normale Leistung in PS 10—20% kleiner ist als die von der Type als Generator aufgenommenen PS.[2]) Sie fallen in der Regel erst bei einem Vielfachen der Normallast ausser Tritt. Stellt man an einen Synchronmotor bezüglich Ankerrückwirkung, Überlastungsfähigkeit und Phasenregulierung geringe Ansprüche, so kann dasselbe Modell mehr leisten als wenn es als Generator benutzt wird.

## g) Der Synchronmotor als Phasenregler.

§ 66. Der Phasenregler nach Berg.

Aus Fig. 106 ist zu ersehen, dass der cos $\varphi$ eines Synchronmotors bei schwacher Erregung kleiner als 1 ist, der Strom eilt bei Untererregung der Spannung nach. Von einem bestimmten Erregerstrom ab wird $\varphi$ positiv, d. h. der Strom eilt voraus und zwar nimmt $\varphi$ mit weiterer Zunahme des Erregerstromes zu, d. h. cos $\varphi$ ab. Der Synchronmotor wirkt bei Übererregung wie ein Kondensator und

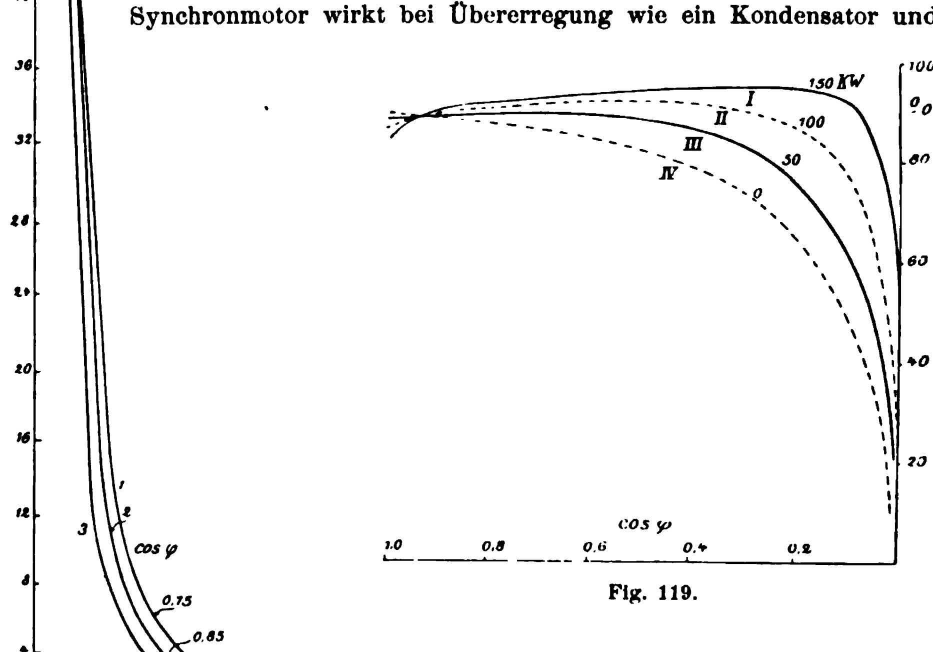



Fig. 118.

Fig. 119.

kann nacheilende Ströme kompensieren. Bei Untererregung wirkt er wie eine Drosselspule. Am wirksamsten als Phasenregler ist ein Motor mit einer V-Kurve, die recht steil ansteigende Äste zeigt. E. J. Berg hat in El. World 28, 1896, p. 622ff. einen sehr interessanten Einblick in die Verhältnisse des Synchronmotors als Phasenregler gegeben,

1) Leitet man durch zwei Schleifringe eines Asynchronmotorankers Gleichstrom, so erhält man auch einen Synchronmotor. Die dritte Phase kann man zur Stabilität des Synchronismus kurz schliessen.

2) Leistet der entsprechende Generator $A$ KW, so kann man für die Motorleistung $A_p$ in PS setzen ($\eta$ Wirkungsgrad):

$$A_p = 1,1 \frac{A}{736} \eta.$$

wovon hier einiges nachstehend wiedergegeben sei. Es handelt sich dabei um eine Wechselstromübertragung von 2000 Volt $\times$ 100 Ampère auf 1 englische Meile. In Fig. 118 ist der Preis des Leitungskupfers

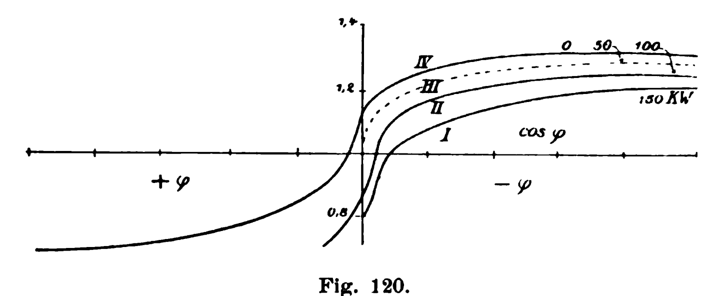



Fig. 120.

in Abhängigkeit der Übertragungsspannung für cos $\varphi = 0{,}75$ (Kurve 1), $= 0{,}85$ (Kurve 2), $= 1{,}0$ (Kurve 3) aufgetragen. Fig. 119 stellt in den Ordinaten prozentuell das Verhältnis

$$\frac{\text{Leistung am entfernten Leitungsende}}{\text{Leistung am Anfang der Leitung}}$$

in Abhängigkeit des Leistungsfaktors cos $\varphi$ im Netze dar und zwar gilt die oberste Kurve I, wenn parallel zur Leitung als Phasenregler ein Synchronmotor von 150 KW $\times$ cos $\varphi$ (der Generator hat 200 KW $\times$ cos $\varphi$) liegt,

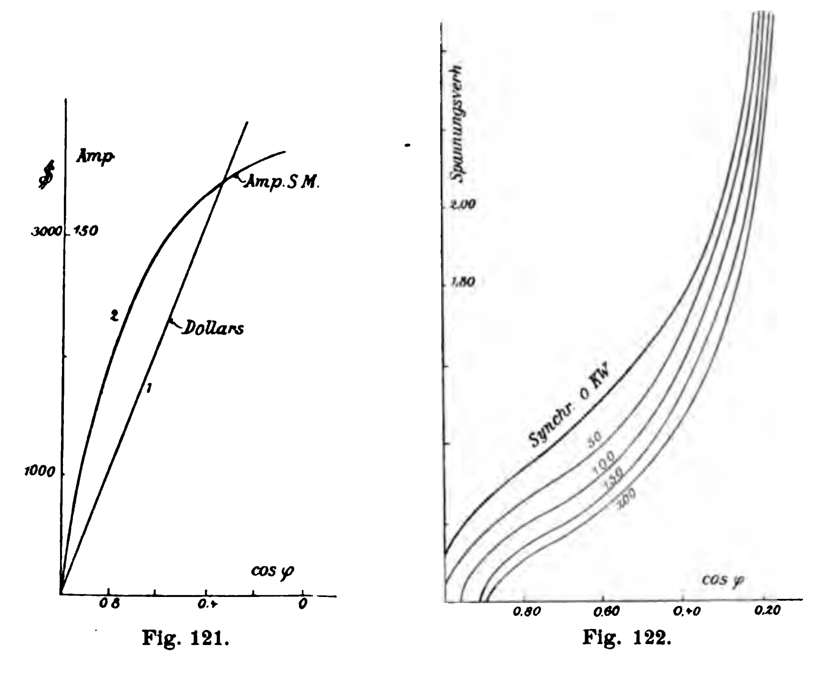



Fig. 121. Fig. 122.

Kurve II für einen Synchronmotor von 100 KW[1]), Kurve III für einen solchen von 50 KW und IV gilt ohne Synchronmotor. Die Spannungsverhältnisse gehen bei variablem cos $\varphi$ aus Fig. 120 hervor. Die Ordinaten bedeuten das Verhältnis

1) Immer „$\times$ cos $\varphi$" zu ergänzen.

$$\frac{\text{Generatorspannung}}{\text{Spannung am Ende der Leitung}}$$

und zwar

| Kurve | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Kurve | I | für einen parallellaufenden | 150 | KW-Synchronmotor |
| „ | II | „ „ „ | 100 | „ |
| „ | III | „ „ „ | 50 | „ |
| „ | IV | | ohne | „ |

Aus Fig. 121 sind die Ersparnisse in Dollars aufgetragen, die bei Verwendung verschiedener Synchronmotoren bei variablem cos $\varphi$ erzielt werden können. Die Ordinaten der Kurve I sind die Ampère des Synchronmotors, diejenigen von II die Dollars.

Die zwei Kurven Fig. 122 und 123 geben noch das Verhältnis

$$\frac{\text{Generatorspannung}}{\text{Spannung am Leitungsende}}$$

und (Fig. 123)

$$\frac{\text{Leistung am Leitungsende}}{\text{Leistung am Leitungsanfang}}$$

(Fig. 122), wenn nicht ein bestimmter Strom 100 Ampère, sondern unabhängig vom cos $\varphi$ stets 200 KW übertragen werden. $J$ cos $\varphi$ ist konstant. Dabei sind vier Synchronmotoren von 200, 150, 100 und 50 KW vorausgesetzt.

Die Kurven zeigen jedenfalls mit genügender Deutlichkeit, dass man, falls eine nennenswerte Phasenregelung verlangt wird, sehr grosse und teuere

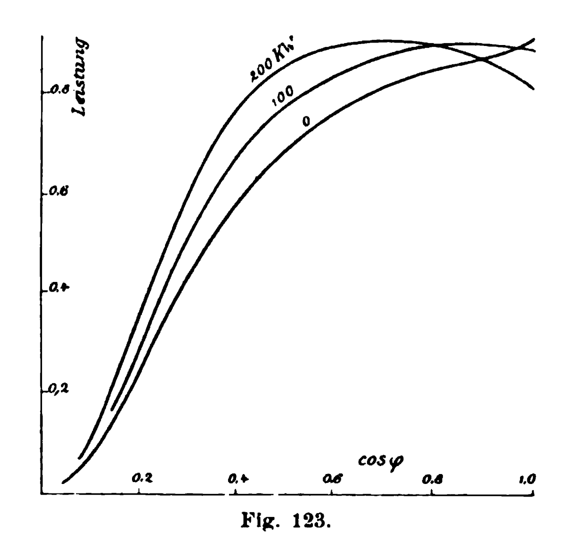



Fig. 123.

Synchronmotoren benötigt. Es ist deshalb empfehlenswert, solche Synchronmotoren nicht leer laufen zu lassen, sondern sie z. B. als Umformer für Erregerzwecke oder sonstwie zu belasten. Es soll am günstigsten sein, den Motor so zu belasten, dass $+\varphi = 45^0$ ist, wobei der Energiestrom 0,7 des Totalstroms ist.

# IV. Mehrphasige Induktionsmotoren.

## a) Allgemeines.

§ 67. Wirkungsweise des Asynchronmotors.

Der asynchrone, mehrphasige Induktionsmotor besteht aus einem vom Netze durch Mehrphasenströme gespeisten Teil, der in der Regel feststeht und primärer Teil, Feld, Ständer, Stator, Gehäuse oder feststehender Teil genannt wird und aus einem vom Netze unabhängigen, in sich oder auf Widerstand geschlossenen Teil, der gewöhnlich rotiert und sekundärer Teil, Anker, Rotor, Läufer oder rotierender Teil heisst. Die Entstehungsweise des Drehfeldes in der primären Wicklung, das mit der Periodenzahl der Netz-Wechselströme rotiert, ist in Band IV ausführlich erörtert, ebenso finden sich dort die Anordnungen der Wicklungen, die für Ständer und Läufer

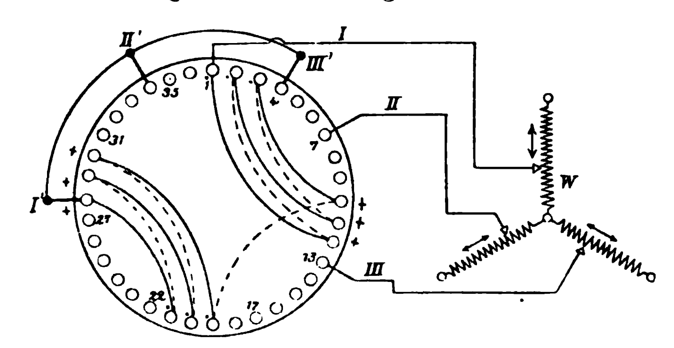



Fig. 124.

prinzipiell identisch sind. In Fig. 124 ist eine Phase eines dreiphasigen Läufers, der auf einen Anlasswiderstand $W$ geschlossen ist, gezeichnet. Der Läufer ist vierpolig und hat drei Nuten pro Pol und Phase.

Steht der Läufer still, so werden in demselben wie in einem ruhenden Transformator elektromotorische Kräfte induziert von der Periodenzahl $n_1$ des Primärfeldes, die zu entsprechenden Strömen Veranlassung geben. Rotiert der Läufer mit der sekundlichen Tourenzahl $n_2$, so ist die Frequenz der elektromotorischen Kräfte und Ströme im Anker nur $n_1 - n_2 = n_s$, wobei $n_1$ Schlüpfung (Schlupf) genannt wird. Die Feld- und Anker-Ampèrewindungen, die im Raume betrachtet, gleiche Frequenz $n_1$ haben, erzeugen wie in Transformatoren ein resultierendes Kraftlinienfeld $K$, das in seiner Einwirkung auf die von Strömen $J_2$ durchflossenen Ankerleiter das Drehmoment $M$ des Drehstrommotors bedingt.

## b) Grundbeziehungen.[1])

§ 68. Drehmoment.

Die Entwickelung der Formeln für die elektromotorische Kraft $E$, die beim Motor als gegenelektromotorische Kraft auftritt, sowie für die resultierenden Ampèrewindungen, die nur geringe Pulsationen zeigen, ist in Band IV ausführlich erörtert. Es erübrigt nur noch die Gleichung des Drehmomentes $M$ zu entwickeln.

---

1) Siehe auch A. Behrend, El. World 1900, p. 725 ff.

Der im Läufer erzeugte Effekt 3 $E_2\ J_2$, Dreiphasenwicklung vorausgesetzt, entspricht jeweils dem durch die Schlüpfung $n_s$ bedingten Effektverlust[1]), d. h.

$$M \cdot 2\pi\, n_s \cdot \frac{1}{p} \cdot 9{,}81 = 3\ E_2\ J_2.$$

Es ist

$$E_2 = c \cdot n_s\, Z_2\, K_2 \cdot 10^{-8}$$

also

$$M^{mkg} = \lambda\, p\, Z_2\, K_2\, J_2 \cdot 10^{-9} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (57)$$

Für einen speziellen Fall[2]), z. B. für den Käfiganker, lässt sich die Entwickelung auch folgendermassen führen. Die Umfangskraft $P_1$ ist bei sinusförmiger Feld- und Stromverteilung pro Leiter

$$P_1 = B_2 \sin a \cdot l \cdot (J_2)_{max} \sin a = B_2\, l\, (J_2)_{max} \sin^2 a$$

und zwar für einen beliebigen Stab, der um den $\sphericalangle\, a$ von dem Maximum $B_2$ der Felddichte abliegt. $l$ ist die Ankerlänge. Bei $Z'_2$ Leitern (total) wird die mittlere Zugkraft am Umfang durch Integration

$$P = \frac{Z'_2}{2} B_2\, l\, (J_2)_{max} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (58)$$

und das Drehmoment $M$ am Durchmesser $d$ ist, wenn $\tau$ die Polteilung ist

$$M = \frac{\pi}{4} \sqrt{2}\ \frac{d}{2}\ \frac{K_2\, J_2}{\tau} = 0{,}555\ d \cdot \frac{K_2\, J_2}{\pi\, d : 2p}$$

$$M = 3{,}6 p\, Z'_2\, K_2\, J_2 \cdot 10^{-10} \text{ in } CGS \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

Das Drehmoment $M$ in $mkg$ ermittelt sich auch einfach aus

$$9{,}81 \cdot M \cdot 2\pi \frac{n_1}{p} = 3\, J_2^{\,2}\, w_2 + A_m$$

$$M = \frac{p}{61{,}6\, n_1} \cdot (3\, J_2^{\,2}\, w_2 + A_m), \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

dabei ist $A_m$ die mechanische Leistung in Watt.

Das Moment ist bei verschiedenen Stellungen des Ankers etwas variabel und zwar um so mehr, je geringer die Unterteilung der Wicklung ist, d. h. je weniger Nuten pro Pol und Phase vorhanden sind. Gute Motoren haben geringere Variationen als $\pm$ 5 %; man trifft allerdings bis $\pm$ 50 %.

§ 69. Grundgleichungen. Als grundlegende Beziehungen für den Drehstrommotor lassen sich nun anschreiben.

$$\text{I)} \quad E = c \cdot n\, Z\, K_a \cdot 10^{-8}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (61)$$

wobei unter $E$ je nachdem die primäre oder sekundäre EMK zu verstehen ist.

$$\text{II)} \quad AW = C \cdot 2{,}12 \frac{J Z}{2p} = C' \frac{J Z}{2p}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

---

1) Alle primären Grössen haben den Index 1, die sekundären den Index 2.
2) Siehe G. KAPP, Die Dynamomaschinen.

wobei $AW$ die Ampèrewindungszahl für einen Pol, also für einen halben magnetischen Kreis ist.

$$\text{III)}\quad M = \lambda p Z_2 K_d J_2 \cdot 10^{-9} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

Die Leiterzahl soll dabei pro Phase gerechnet werden, $E$ und $J$ sind Effektivwerte, $K_d$ ist die thatsächliche Gesamtkraftlinienzahl (in III diejenige im Anker) pro Drehfeldpol. Primär ist für $n$ der Wert $n_1$ (Periodenzahl des Netzes), sekundär $n_1 - n_2 = n_s$, die Schlüpfung, zu setzen.

§ 70. Ampère-windungen.

Den Wert von $AW$ findet man folgendermassen: Man ermittelt aus dem gewählten Werte $K_d$ die verschiedenen mittleren Induktionen $B_{mitt}$ in den einzelnen Querschnitten $q$ des magnetischen Kreises, d. h.

$$B_{mitt} = \frac{K_d}{q},$$

wobei allerdings nach Späterem auf die Streuung Rücksicht zu nehmen ist. Bei Leerlauf ist, wenn

$$\tau_1 = \frac{\text{magnetischer Widerstand des primären Streufeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des Hauptfeldes}}$$

der primäre Streukoeffizient ist ($\sigma = \tau_1 + \tau_2$ der gesamte Streukoeffizient[1]), $\tau_1 \cong \tau_2 = 0{,}02 - 0{,}2$), die Luftinduktion $B_l$

$$B_l = \frac{B_1}{1 + \tau_1},$$

wenn $B_1$ die primäre Induktion bedeutet. Für Leerlauf ist auch sekundär $B_2 = \sim B_l$. Bei Belastung müssen die späteren Theorien berücksichtigt werden.

Aus der Motorskizze entnimmt man die magnetischen Weglängen $l$ und aus einer Charakteristik die zu $B_{mitt}$ gehörige Permeabilität $\mu$, dann ist

$$AW = \Sigma \frac{10}{4\pi} B_{mitt} \frac{l}{\mu} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

Es ist zu betonen, dass für diese Berechnung der $AW$ nicht die Maximalwerte $B_{max}$ der Induktionen, sondern die Mittelwerte in Frage kommen. Die Permeabilität $\mu$ ist für rasch wechselnde Magnetisierung kleiner als für statische (ballistisch oder magnetometrisch gemessen), z. B. bei 50 Cykel um ca. 5—10%.

§ 71. Koeffizienten.

Es ist

$$B_{max} = k\, B_{mitt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

Bei Sinusform der Kraftlinienverteilung wird

$$k = \frac{\pi}{2} = 1{,}57.$$

Der Wert von $c$ und derjenige von $C$ und $C'$ in Gleichung I und II ist in Bd. IV für eine Reihe Wicklungen angegeben. Der Wert von $\lambda$ ist

$$\lambda = \frac{3c}{9{,}81 \cdot 2\pi} = 0{,}0486\, c \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (66)$$

---

1) Genauer $\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$.

Nachstehend sind zwei Tabellen für die Koeffizienten $c$[1]), $C'$, $\lambda$, $k$ zusammengestellt, die auf Angaben von HEUBACH und KAPP basieren ($s$ = Spulenbreite, $\tau$ = Teilung):

| Anzahl Nuten pro Pol und Phase | Maximum[1] $c$ | Minimum[1] $c$ | Mittel $c$ | Sinusform $c$ | Minimum[1] $k$ | Maximum[1] $k$ | Mittel $k$ | Sinusform $k$ | $\lambda'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Zweiphasen 1 | 2,83 | 2,00 | 2,41 | 2,22 | 1,41 | 2,00 | 1,70 | 1,57 | 1,00 |
| $\left(s \cong \frac{\tau}{2}\right)$ 2 | 2,24 | 2,11 | 2,18 | 2,05 | 1,89 | 2,00 | 1,94 | " | 0,92 |
| 3 | 2,14 | 1,95 | 2,05 | 2,02 | 1,82 | 2,00 | 1,91 | " | 0,91 |
| 4 | 2,11 | 1,99 | 2,05 | 2,01 | 1,89 | 2,00 | 1,94 | " | 0,91 |
| 5 | 2,08 | 1,95 | 2,01 | 2,01 | 1,86 | 2,00 | 1,93 | " | 0,90 |
| $\infty$ | 1,98 | 1,87 | 1,92 | 2,00 | 1,89 | 2,00 | 1,94 | " | 0,90 |
| Dreiphasen 1 | 2,46 | 2,12 | 2,29 | 2,22 | 1,50 | 1,74 | 1,62 | " | 1,00 |
| $\left(s \cong \frac{\tau}{3}\right)$ 2 | 2,21 | 2,18 | 2,20 | 2,14 | 1,72 | 1,74 | 1,73 | " | 0,97 |
| 3 | 2,16 | 2,10 | 2,13 | 2,13 | 1,69 | 1,74 | 1,71 | " | 0,96 |
| 4 | 2,16 | 2,14 | 2,15 | 2,12 | 1,71 | 1,74 | 1,72 | " | 0,96 |
| 5 | 2,15 | 2,10 | 2,12 | 2,12 | 1,70 | 1,74 | 1,72 | " | 0,96 |
| $\infty$ | 2,08 | 2,05 | 2,06 | 2,12 | 1,71 | 1,74 | 1,72 | " | 0,96 |

HEUBACH.

Hierbei ist $\lambda'$ bestimmt für die Beziehung der Zugkraft

$$P_{kg} = 7{,}21\,\lambda' p\, Z_t J B_{max} l \cdot 10^{-8} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (67)$$

wenn $Z_t$ die totale Ankerleiterzahl und $l$ die Ankerlänge ist.

| Wicklung | $c$ | $C'$ | $\lambda$ |
|---|---|---|---|
| Käfig | 2,22 | 0,67 | 1,08 |
| Dreiphasig[2], $s = \frac{\tau}{3}$ | 2,12 | 0,64 | 1,02 |
| Zweiphasig, $s = \frac{\tau}{2}$ | 2,00 | 0,61 | 0,96 |
| Dreiphasig, $s = \frac{2}{3}\tau$ schleichend | 1,84 | 0,55 | 0,90 |

KAPP.

In letzter Tabelle sind theoretisch unendlich viele Nuten pro Pol und Phase vorausgesetzt.

1) Der Spannungskoeffizient $c$ schwankt zwischen einem Maximum und einem Minimum mit dem Schwanken des Drehfeldes $K_d$, siehe Band IV, Seite 79ff. $k$ ist ähnlichen Variationen unterworfen.

2) $s$ ist die Breite einer Spule, $\tau$ die Polteilung.

Es ist ziemlich allgemein üblich, bei Dreiphasenmotoren mit dem Werte $c = 2{,}1$ zu rechnen. Für $C'$ ergaben zahlreiche Messungen des Verfassers an Drehstrommotoren Werte, die in der Regel zwischen 0,74 und 0,84 lagen.

J. B. KRANTZ[1]) hat unter Voraussetzung sinusförmiger Ströme und von Proportionalität zwischen Ampèrewindungen und Flux in allgemeiner Weise — also nicht bloss für zwei extreme Fälle wie HEUBACH — folgende vier interessante Resultate ermittelt:

1) Die maximale Zahninduktion ist von Zahn zu Zahn verschieden, sie ist da am grössten, wo zwei Spulen verschiedener Phase aneinanderstossen, und in der Mitte einer Spulenhälfte am kleinsten. Das Verhältnis der grössten Maximalzahninduktion zur kleinsten ist bei $q$ Nuten pro Pol und Phase

$$\text{wenn } q \text{ gerade: } \frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}15,$$

$$\text{wenn } q \text{ ungerade: } \left.\frac{2q}{\sqrt{1+3q^2}}\right|_{q=\infty} = 1{,}15.$$

2) Der Gesamtkraftlinienflux in verschiedenen Stellungen des Motorumfangs betrachtet, ist wenig variabel, er schwankt zwischen dem

$$\text{Maximum } \frac{7q^2+1}{4}$$

und dem

$$\text{Minimum } q\sqrt{1+3q^2}.$$

Das Verhältnis ist für $q = 1$ gleich 1,00, für $q = \infty$ gleich 1,01. Die Schwankung ist also maximal nur 1%!

3) Die Winkelgeschwindigkeit des Fluxes ist sehr stark variabel. Das Verhältnis

$$\frac{\text{maximale}}{\text{minimale}} \text{ Winkelgeschwindigkeit ist } 1{,}33,$$

d. h. sie schwankt um 33%. Sie ist in der Mitte einer Spulenhälfte ein Minimum.

4) Der Spannungskoeffizient $c$ — allerdings definiert als Verhältnis: $2\,\dfrac{\text{Maximalinduktion}}{\sqrt{2}\,.\ \text{Mittlere Induktion}}$ — findet sich zu

$$\frac{4\pi\,(5q^2+1)}{3\sqrt{2}\,(7q^2+1)}.$$

Für $q = 1$ wird $c = 2{,}22$, für $q = \infty$ ist $c = 2{,}137$.

§ 73. Drehfelder.

In Band IV sind als Polardiagramm Drehfelder für spitze und flache Stromkurven gezeichnet, die für Zweiphasenströme Geltung haben. Fig. 125 zeigt ein Drehfeld, das durch Dreiphasenströme bei spitzem Kurvenverlauf sich ausbildet.

---

1) Siehe E. T. Z. 1901.

Die Westinghouse Co. strebt durch besondere Wickelanordnung ein möglichst sinusförmiges Drehfeld an: Während ein gewöhnlicher Zwei-

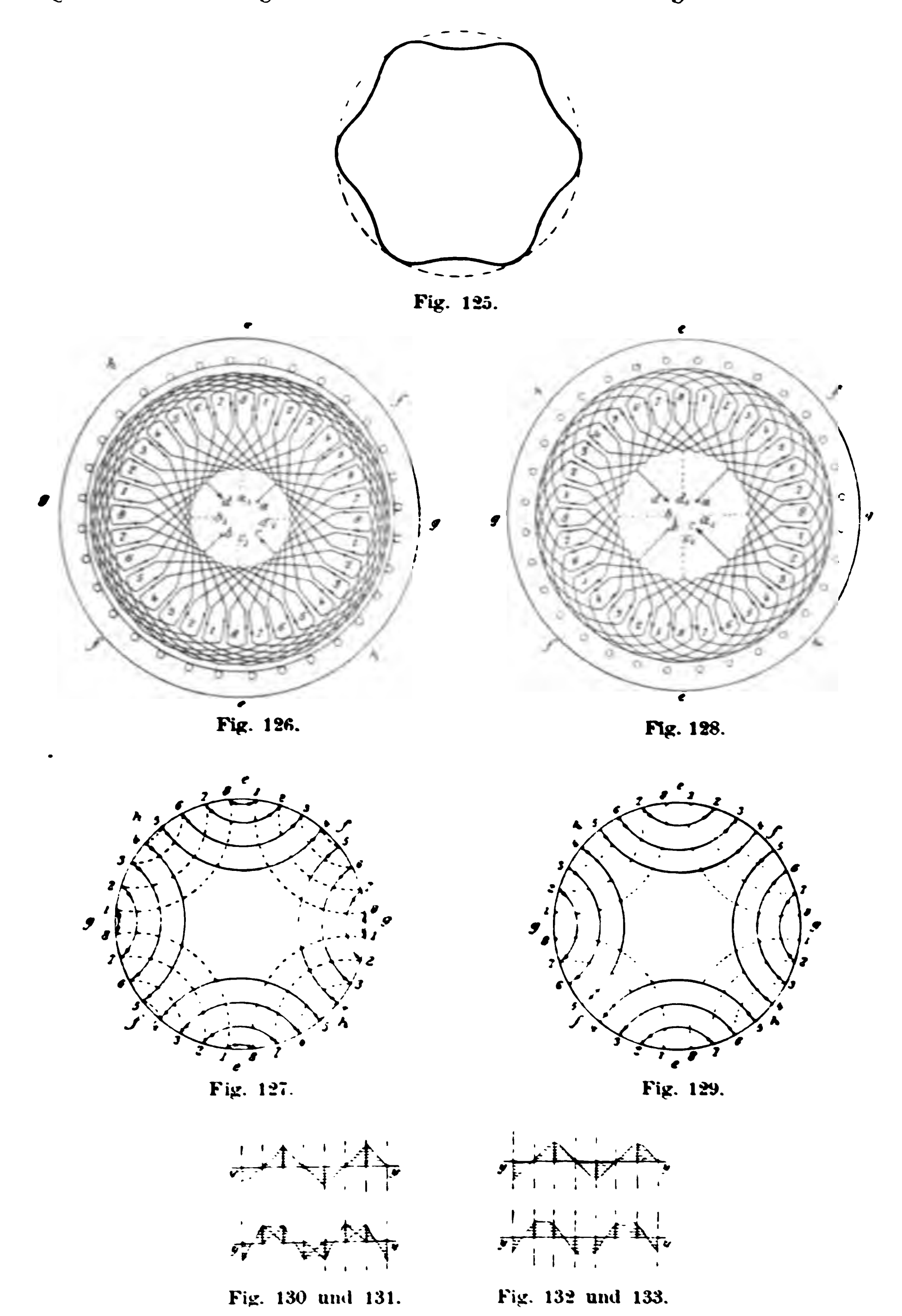


Fig. 125.

Fig. 126. Fig. 128.

Fig. 127. Fig. 129.

Fig. 130 und 131. Fig. 132 und 133.

phasenanker mit vier Polen nach Schema Fig. 126 und 127 gewickelt ist, wird nach E. P. 5064 vom 4. Februar 1899 die Wicklung nach Fig. 128

und 129 angeordnet. Es sind je 32 Nuten zu 2 Stäben. Zu der ersten Anordnung gehört die Drehfeldverteilung Fig. 130 und 131. Für die patentierte Wicklung findet sich die gleichförmigere Verteilung 132 und 133. (Die zwei Kurven entsprechen den öfters erwähnten Momenten, von denen der eine das grösste Maximum, der andere das kleinste Maximum darstellt.)

### c) Theorie von Dr. Behn-Eschenburg.

§ 73. Theorie von Dr. Behn.

Dr. BEHN-Eschenburg hat in E. T. Z. 1896, Heft 1ff. eine vollständige analytische Theorie des dreiphasigen Drehstrommotors wie folgt gegeben. Alle Grössen für den feststehenden Teil haben den Index 1, für den rotierenden Teil den Index 2. Die Gleichungen des Dreiphasenmotors sind dann (die kleinen Buchstaben bedeuten Momentanwerte):

$$\left.\begin{aligned} i_1 w_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\,\Sigma(\mu i_2)}{dt} &= e_1 \\ i_2 w_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{d\,\Sigma(\mu i_1)}{dt} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (68)$$

Das Summenzeichen bezieht sich auf sämtliche Phasen eines Systems (Ständer 3, Läufer $p'$). $L$ ist der Selbstinduktionskoeffizient, $\mu$ der Momentanwert ($\mu_{max}$ der Maximalwert) des gegenseitigen Induktionskoeffizienten. Ist $n_1$ die primäre Periodenzahl, $n_2$ die sekundliche Tourenzahl, $2\pi n_1 = \omega_1$, $2\pi n_2 = \omega_2$, $m$ das Übersetzungsverhältnis von der primären auf die sekundäre Wicklung,

$$\sigma_0 = 1 - m\frac{E_2}{E_1}$$

der Streuungskoeffizient und $1 - \sigma' = (1 - \sigma_0)^2$.

Es ist dann

$$1 - \sigma' = 1 - \frac{\mu^2_{max}}{L_1 L_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (69)$$

Ferner sei

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{3}{p'} m^2 = m_1$$

und

$$w_3 = w_2 + s\frac{w_1}{m_1},$$

wenn

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1},$$

die Schlüpfung ist; schliesslich

$$a_1 = \frac{\omega_1 L_1}{w_1},\quad a_2 = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\,L_2}{w_2},\quad a_3 = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\,\sigma L_2}{w_3}\left(1 + \frac{1}{\sigma' a_1 a_2}\right).$$

Nun folgen aus obigen Gleichungen folgende Resultate unter Verwendung der Effektivwerte (grosse Buchstaben):

Der primäre Strom

$$J_1 = \frac{E_1 w_2 \sqrt{1 + \alpha_2^2}}{\omega_1 L_1 w_2 \sqrt{1 + \alpha_2^2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (70)$$

Der primäre Effekt

$$A_1 = 3\, E_1 J_1 \cos \varphi_1 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (71)$$

Der sekundäre Strom

$$J_2 = \frac{E_2 s}{w_2 \sqrt{1 + \alpha_2^2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (72)$$

Der sekundäre Effekt

$$A_2 = p'\, E_2 J_2 \cos \varphi_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (73)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_2^2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (74)$$

Der primäre Leistungsfaktor, der für das Netz in Betracht kommt,

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 \frac{\alpha_2}{\sqrt{1 + \alpha_2^2}} - \sin \varphi_2 \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_2^2}} \quad \ldots \quad (75)$$

Die Nutzleistung $A$ einschliesslich Eisenverluste und Reibung von der Grösse $A_0$ ist

$$A + A_0 = \frac{p'\, J_2^2 \cdot w_2}{s} \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{A_2}{s} \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(1 + \frac{s}{w_2} \frac{w_1}{m_1}\right) \quad \ldots \quad (76)$$

Der Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{A}{A_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 (1 - \sigma')} + \frac{1}{\alpha_1\, \alpha_2 (1 - \sigma)}\right) - \frac{A_0}{A_1} \quad \ldots \quad (77)$$

Der Einfluss der Wirbelströme ist zu berücksichtigen durch eine Vergrösserung von $w_1$ und $w_2$ und durch eine Verminderung der verschiedenen Werte von $L$ und von $\sigma$.

§ 74. Anwendung der Theorie. Dr. Behn schneidet nun die Formeln für die Praxis zu und vernachlässigt z. B. $w_1$ gegen $\omega_1 L_1$, $w_2$ gegen $\omega_1 L_2$, $\sigma$ gegen 1. Betrachtet man den Motor bei Leerlauf, so ist, wenn alle Leerlaufgrössen den Index 0 erhalten,

$$\left.\begin{aligned} &\text{die Tourenzahl} & u_0 &= \frac{120 \cdot n_1}{2p}, \\ & & \omega_2 &= \omega_1, \\ &\text{der primäre Strom} & J_0 &= \frac{E_1}{\omega_1 L_1}, \\ &\text{die Leerlaufverluste} & A_0 &= 3\, E_1 J_0 \cos \varphi_0 - 3\, J_0^2 w_1 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (78)$$

Für den ruhenden Motor bei kurzgeschlossenem Anker findet sich, wenn hierfür der Index $a$ verwendet wird,

$$\text{der Strom } J_a = \frac{E_1}{\omega_1 L_1 \sigma'} \sqrt{1 + \frac{w_2^2}{\sigma'^2 \omega_1 L_2^2}} \quad \ldots \quad (79)$$

$$9{,}81 \cdot M_a \cdot \omega_1 = A_a = 1{,}03\, u_0\, M_a = p'\, J_a^2 (1 - \sigma')\, m_1\, w_2 - A_0 \quad . \quad (80)$$

($M_a$ ist das Anzugsmoment, $u_o$ die dem Leerlauf entsprechende Tourenzahl). Nimmt man $J_0$, $A_0$, $J_a$ und $A_a$ bezw. $M_a$ auf, so ist der Motor bestimmt. Zwischen $J_0$ und $E_1$ sowie $J_a$ und $E_1$ herrscht nur angenäherte Proportionalität, $A_0$ ist für normale Cykelzahl und Spannung aufzunehmen.

Für $\sigma$ findet sich

$$\sigma' = \frac{J_0}{J_a} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (81)$$

wenn bei der Messung beider Ströme $E_1$ dasselbe ist, sonst

$$\frac{E_{1/0}}{E_{1/a}} \cdot \sigma' = \frac{J_0}{J_a} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (81a)$$

($E_{1/0}$ primäre Spannung bei Leerlauf, $E_{1/a}$ primäre Spannung bei Stillstand).

Die wichtigsten Betriebswerte lassen sich nun in Abhängigkeit der bei Leerlauf und Kurzschluss gemessenen Grössen angeben. Hierzu seien noch folgende Kürzungen vorgenommen, alles auf normale Spannung reduziert

$$\left.\begin{array}{c} J_e = \dfrac{A + A_0}{3 E_1} \dfrac{\omega_1}{\omega_2} \\ a_1 = \dfrac{E_1}{w_1 J_0},\ a_2 = \dfrac{E_1 s}{J_0 m_1 w_2},\ a_3 = \dfrac{E_1 s \sigma'}{J_0 m_0 w_3} \left(1 + \dfrac{w_1 w_2 J_0^2 m_1}{\sigma E_1^2 s}\right) \\ \sigma'^2 = \dfrac{J_0^2}{J_a^2} - \dfrac{J_0 (m_1 w_2 + w_1)^2}{E_1^2} \\ \dfrac{1 - \sigma'}{\sigma'} = \dfrac{(A_a - A_0)\, \omega_1}{3 w_2 m_1 J_a J_0 \omega_2} \end{array}\right\} \quad . \ . \quad (82)$$

Dann findet sich für den primären Strom

$$J_1^2 = \frac{J_0^2}{\left(1 + s \dfrac{w_1}{m_1 w_2}\right)(1 + a_3)^2} + \frac{J_e^2 \left(1 + s \dfrac{w_1}{m_1 w_2}\right)(1 + a_3^2)}{(1 - \sigma')^2}, \quad (83)$$

für den primären Leistungsfaktor

$$\cos \varphi_1 = \frac{J_e \left(1 + \dfrac{s w_1}{m_1 w_2} - \sigma'\right)}{J_1 (1 - \sigma')} \quad \ldots \ldots \quad (84)$$

für den Wirkungsgrad bei der Tourenzahl $u$

$$\eta = \left(1 - \frac{A_0}{A + A_0}\right) \frac{u}{u_0} \left(1 - \frac{s w_1}{m_1 w_2 (1 - \sigma')} - \frac{w_1 w_2 m_1 J_0^2}{s \cdot E_1^2}\right) . \quad . \quad (85)$$

Bei Leerlauf seien die Kupferverluste primär

$$A'_0 = 3 J_0^2 w_1,$$

bei Kurzschluss

$$A'_a = 3 J_a^2 w_1$$

dann ergiebt sich der maximale Wirkungsgrad bei

$$s^2 = \frac{A_0 w_1^2 w_2^2 m^2 m_1}{\omega_2^2 E_1^2 p^2 w_1} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{A'_0 (1-\sigma')}{A_0}\right)}{\left(1 + \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{A_0}{A'_0}\right)} \quad \ldots \quad (86)$$

Hierfür ist angenähert die Motorleistung

$$A + A_0 = \frac{8 E_1 J_0 (1-\sigma') w_2}{w_1} \sqrt{\frac{A_0}{A'_0}} \left(1 + \frac{w_1 J_0}{E_1} \sqrt{\frac{A_0}{A'_0}}\right) \quad \ldots \quad (87)$$

und

$$J_1 = J_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{A_0}{A'_0}}{1 + \frac{\sigma' A_0}{A'_0}}} \quad \ldots \quad (88)$$

und

$$\eta_{max} = 1 - \frac{1\, A_0 A'_0}{3 E_1 J_0} \left(1 + \frac{\omega_1}{\omega_2 (1-\sigma')}\right) \quad \ldots \quad (89)$$

Die maximale Leistung $A + A_0$ tritt ein für

$$s = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2\omega_1^2 L_2^2 \sigma'^2}{w_2^2}}}{\frac{2\omega_1^2 L_2^2 \sigma'^2}{w_2^2}} \quad \ldots \quad (90)$$

oder angenähert für

$s =$ [illegible] (90a)

Dann ist

$A_{max} =$ [illegible] $- A_0$ (91)

oder angenähert

[illegible] (91a)

und

$$A + A_0 = \frac{3\,E_1\,(1 - \sigma')\,J_0\,(1 - s)}{\sqrt{\sigma'}\left(1 + \frac{w_1\,J_0}{\sqrt{\sigma'}\,E_1}\right)} \quad \ldots \ldots \quad (96)$$

Der reciproke Überlastungsfaktor $\frac{\text{Normale}}{\text{Maximale}}$ Leistung findet sich proportional

$$2\,\sigma'\,\sqrt{c} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (97)$$

wenn $c$ das Verhältnis $\frac{\text{Konstante Verluste}}{\text{Ohmsche Verluste}}$.

Ist im Anker ein Zusatzwiderstand $w_\varrho$, so ist die Anlaufstromstärke

$$J_a'^2 = J_0^2 \frac{[(w_2 + w_\varrho)^2 + \omega_1^2\,L_2^2]}{(w_2 + w_\varrho)\left[1 + \left(\frac{w_1}{m_1\,(w_2 + w_\varrho)}\right)\right] + \omega_1^2\,L_2^2\,\sigma'^2} \quad (98)$$

und das Drehmoment $M_a$ beim Anzug bestimmt sich aus der sekundlichen Arbeit $\left(\text{bezogen auf } \frac{120\,\omega_1}{2p} \text{ Touren}\right)$:

$$9{,}81\,M_a \cdot \frac{\omega_1}{p} = A'_a = \frac{p'\,E_2^2\,(w_2 + w_\varrho)\,\omega_1}{\left[(w_2 + w_\varrho)^2\left(1 + \frac{w_1}{m_1\,(w_2 + w_\varrho)}\right)^2 + \omega_1^2\,L_2^2\,\sigma'^2\right]\omega_1} \quad (99)$$

Für

$$w_2 + w_\varrho = \omega_2\,\sigma'\,L_2 = \frac{E_1}{J_a\,m_1}$$

wird

$$J_a' = \frac{J_0}{1{,}4\,\sigma'} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (100)$$

und $A_a'$ ein Maximum, nämlich

$$9{,}81 \cdot (M_a)_{max}\frac{\omega_1}{p} = (A_a)'_{max} = \frac{3\,(1 - \sigma')\,E_1\,J_a}{1{,}4}\,\frac{\omega_2}{\omega_1} \quad \ldots \quad (101)$$

Das Verhältnis maximales Anzugsmoment: maximalem Moment beim Lauf ist

$$\frac{(A'_a)_{max}}{(A + A_0)_{max}} = 1{,}4\left(1 + \frac{w_1\,J_a}{E_1}\right) \quad \ldots \ldots \quad (102)$$

und das Verhältnis der zugehörigen Ströme

$$\frac{J_1}{J'_a} = \frac{\sigma'\sqrt{w_2^2 + s^2\,\omega_1^2\,L_2}}{w_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (103)$$

Für eine Tourenregulierung durch Ankerwiderstand findet sich, wenn der Ausdruck

$$\frac{A + A_0}{\omega_2} = M$$

dem Moment proportional gesetzt wird,

$$s = \frac{(w_2 + w_\varrho)\, p'\, E_2^{\,2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\, M^2 \omega^4{}_1{}^2 \sigma'^2 L_2^{\,2}}{p'^2 E_2^{\,4}}}\right)}{2\, \omega_1^{\,3}\, \sigma'^2\, L_2^{\,2}\, M} \quad \cdot \cdot \quad (104)$$

oder

$$s = k_1 \frac{w_2 + w_\varrho}{M} \left(1 \pm \sqrt{1 - k_2 M}\right) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (105)$$

wenn $k_1$, $k_2$ konstant angenommen wird.

Anschliessend werden in der citierten Abhandlung die verschiedenen Werte noch nach Möglichkeit aus den Dimensionen berechnet.

## d) Theorie von Steinmetz.

§ 75. Theorie von Steinmetz.

STEINMETZ behandelt den Induktionsmotor in seinem Werke „Alternating Current Phenomena“ auf Grund komplexer Grössen. Diese Theorie soll nachstehend in ihren Grundzügen wiedergegeben werden. Er betrachtet den Induktionsmotor als einen allgemeinen Wechselstromtransformator, der gegenüber dem stationären Transformator den Unterschied aufweist, dass die sekundäre und primäre Wicklung eine relative Bewegung gegeneinander ausführen und dass beide Wicklungen aus einer Reihe um bestimmte Winkel versetzter Systeme bestehen. Sind $E'_2$, $J'_2$, $w'_2$, $x'_2$ die thatsächlichen Sekundärwerte für die elektromotorische Kraft pro Stromkreis (Phase), für die Stromstärke, den Widerstand und die Reaktanz $2\pi\, n_s\, L'_2$, so werden dieselben sämtlich auf den primären Kreis[1]) vermittelst des Reduktionsfaktors

$$a = \frac{Z_1 p_1'}{Z_2 p_2'}$$

reduziert ($Z_1$ primäre Leiterzahl, $p'_1$ primäre Phasenzahl), also

$$E_2 = a E'_2,\ J_2 = \frac{J_2'}{a},\ w_2 = a^2 w_2',\ x_2 = a^2 x_2'.$$

Alle folgenden Beziehungen gelten für einen Stromkreis.

Die primäre Admittanz $Y$ ist[2])

$$Y = g + jb = \frac{J_l}{E_1} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (106)$$

wenn $J_l$ den primären Leerlaufstrom ohne Lagerreibung darstellt.

$g$ bestimmt sich aus ($p'$ Phasenzahl):

$$p'\, g\, E_1^{\,2} = A_{H+W} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (107)$$

$A_{H+W}$ sind die Eisenverluste in Watt.

$b$ bestimmt sich aus

$$\frac{p'}{2 \cdot \sqrt{2}}\, Z_1\, b\, E_1 = R \cdot K \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (108)$$

---

1) Die primären Grössen haben den Index 1, die sekundären den Index 2.

2) $j$ ist das Zeichen des Imaginären.

$R$ ist die magnetische Reluktanz pro Stromkreis, $K$ die Kraftlinienzahl pro Pol. $gE_1$ ist die Arbeitskomponente und $bE_1$ die magnetisierende Komponente des Leerlaufstromes.

Die primäre (elektrische) Reaktanz $\mathfrak{z}_1$ ist

die sekundäre

$$\left.\begin{array}{l} \mathfrak{z}_1 = w_1 - jx_1 \\ \mathfrak{z}_2 = w_2 - jsx_2 \end{array}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (109)$$

$s$ ist die Schlüpfung, bezogen auf die primäre Frequenz als Einheit. Ferner ist

$$E_1 = \sqrt{2}\,\frac{\pi}{2}\,n_1 Z_1 K \cdot 10^{-8}.$$

Auf dieser Grundlage findet sich die Klemmenspannung zu

$$E_k = E_1\left[1 + \frac{s(w_1 - jx_1)}{w_2 - jsx_2} + (w_1 - jx)(g + jb)\right]$$

$$= E_1\left[1 + s\frac{\mathfrak{z}_1}{\mathfrak{z}_2} + \mathfrak{z}_1 Y\right] \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (110)$$

$$J_1 = E_1\left(\frac{s}{\mathfrak{z}_2} + Y\right) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (111)$$

und aus beiden

$$J_1 = \frac{[(sw_2^2 + s^2 w_1) + w_2^2 g + sw_2(w_1 g - x_1 b)}{(w_2 + sw_1)^2 s^2 (x_2 + x_1)^2}$$

$$\frac{+ s^2 x_2 (x_1 g + x_2 g + w_1 b)] + j[s^2(x_1 + x_2) + w_2^2 b + sw_2(x_1 g + w_1 b) + s^2 x_2 (x_1 b + x_2 b - w_1 g)}{(w_2 + sw_1)^2 s^2 (x_2 + x_1)^2}\, x E_k \quad (112)$$

und die Phasenverschiebung $\varphi$ zwischen $J_1$ und $E_k$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{s^2(x_1 + x_2) + w_2^2 b + sw_2(x_1 g + w_1 b) + s^2 x_2 (x_1 b + x_2 b - w_1 g)}{(sw_2 + s^2 w_1) + w_2^2 g + sw_2(w_1 g - x_1 b) + s^2 x_2 (x_1 g + x_2 g + w_1 g)} \;. \quad (113)$$

§ 76. Drehmoment.

Das Drehmoment $M$ ist bei $2p$ Polen[1])

$$M = 2p \cdot \frac{K}{\sqrt{2}} \cdot \frac{AW_2}{\sqrt{2}} \sin(KAW_2)$$

oder

$$M = 2p\,\frac{K}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p' Z_2 J_2}{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \sin(KJ_2)$$

oder

$$M = \frac{pp' Z_2 K J_2}{2\sqrt{2}} \sin(KJ_2)$$

ferner

$$\sin(KJ_2) = \frac{w_2}{\sqrt{w_2^2 + s^2 x_2^2}}$$

---

1) $AW_2$ = sekundäre Ampèrewindungen, $Z_2$ sekundäre Leiterzahl.

$$J_2 = \frac{E_1 s}{\sqrt{w_2^2 + s^2 x_2^2}}$$

$$K = \frac{2 \cdot E_1 \cdot 10^8}{\sqrt{2}\, \pi Z_2 n_1}$$

also in C. G. S.

$$M = \frac{2 p p' s w_2 E_1^2}{4 \pi n_1 (w_2^2 + s^2 x_2^2)} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (114)$$

Die mechanische Leistung des Motors ist

$$A_m = M \cdot \omega_2$$

$$\omega_2 = \frac{4 \pi n_1}{2 p} (1 - s)$$

also

$$A_m = \frac{p' w_2 E_1^2 s (1 - s)}{w_2^2 + s^2 x_2^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (115)$$

Es lässt sich auch schreiben

$$M = \frac{2 p p' w_2 E_k^2 s}{4 \pi n_1 [(w_2 + s w_1)^2 + s^2 (x_2 + x_1)^2]} \quad \ldots \ldots \quad (116)$$

und

$$A_m = \frac{p' w_2 E_k^2 s (1 - s)}{(w_2 + s w_1)^2 + s^2 (x_2 + x_1)^2} \quad \ldots \ldots \quad (117)$$

Durch Differentieren ergiebt sich für das maximale Drehmoment $M_{max}$

$$M_{max} = \frac{2 p p' E_k^2}{8 \pi n_1 \left[w_1 + \sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2}\right]} \quad \ldots \ldots \quad (118)$$

bei einer Schlüpfung $s_m$

$$s_m = \frac{w_2}{\sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (119)$$

und bei einer Leistung

$$(A_m)_m = \frac{p' E_k^2 \left[\sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2} - w_2\right]}{2 \sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2} \left[\sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2} + w_1\right]} \quad \ldots \quad (120)$$

Dies ist nicht die maximale Leistung, sondern etwas weniger, die maximale Leistung tritt bei etwas kleinerer Schlüpfung als $s_m$ auf.

§ 77. Anlauf.

Das maximale Anzugsmoment erhält man, wenn

$$s_m = 1,$$

d. h. wenn

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (121)$$

Die maximale Leistung ergiebt sich zu[1])

$$(A_m)_{max} = \frac{p' E_k^2}{2 \left[(w_1 + w_2) + \sqrt{(w_1 + w_2)^2 + (x_2 + x_1)^2}\right]} = \frac{p' E_k^2}{2 (W + \delta)} \quad (122)$$

---

1) $W = w_1 + w_2$.

bei einer Schlüpfung $s_n$

$$s_n = \frac{w_2}{w_2 + \sqrt{(w_2 + w_1)^2 + (x_2 + x_1)^2}} = \frac{w_2}{w_2 + \mathfrak{z}} < s_m \quad . \quad . \quad (123)$$

Das Moment $M_m$ bei $(A_m)_{max}$ ist

$$M_m = \frac{2\,p\,p'\,E_k^2\,(w_2 + \mathfrak{z})}{8\,\pi\,n_1\,\mathfrak{z}\,(W + \mathfrak{z})} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (124)$$

In Annäherung gilt für den Anlauf

$$\left.\begin{aligned} (J_1)_a &= \frac{E_k}{\mathfrak{z}} \\ (\operatorname{tg}\varphi)_a &= \frac{x_2 + x_1}{w_2 + w_1} \\ M_a &= \frac{2\,p\,p'\,E_k^2}{4\,\pi\,n_1}\,\frac{w_2}{\mathfrak{z}^2} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (125)$$

Bei 100 % Wirkungsgrad und $\cos\varphi_1 = 1$ wäre das Anzugsmoment

$$(M)_a' = \frac{2\,p\,p'}{4\,\pi\,n_1}\,E_k\,(J_1)_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (126)$$

Das Verhältnis zwischen dem thatsächlich grössten Anzugsmoment $M_a$ und dem theoretisch grössten $M_a'$

$$= \frac{M_a}{M_a'}$$

giebt ein Urteil über die Güte des Motors bezüglich seiner Anzugskraft, die Verhältniszahl erreicht Werte bis 0,9.

Das Anzugsmoment $M_a$ lässt sich auch schreiben

$$\begin{aligned} M_a &= \frac{2\,p\,p'}{4\,\pi\,n_1}\,J_1^2\,w_2 \\ &= \frac{p'\,J_1^2\,w_2}{\left(\frac{4\,\pi\,n_1}{2\,p}\right)} = \frac{\text{Verlust im Motoranker}}{\text{synchrone Geschwindigkeit}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (127) \end{aligned}$$

Für das maximale Anzugsmoment erhält man die Bedingung

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + (x_2 + x_1)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (128)$$

Der zusätzliche Ankerwiderstand zum eigentlichen Ankerwiderstand $w_2$ sei $w_2''$, dann ist allgemein zur Erreichung eines Momentes $M_a$ erforderlich

$$w_2'' = -w_2 - w_1 + \frac{2\,p\,p'\,E_k^2}{8\,\pi\,n_1\,M_a} \pm \sqrt{\left(\frac{2\,p\,p'\,E_k^2}{8\,\pi\,n_1\,M_a}\right)^2 - \frac{2\,p\,p'\,E_k^2\,w_1}{4\,\pi\,n_1\,M_a} - (x_2 + x_1)^2} \quad (129)$$

Man erhält also zwei Werte von $w_2''$; wählt man das negative Vorzeichen, so erhält man einen kleinen Widerstand $w_2''$ und einen grossen Strom, beim positiven Zeichen ist es umgekehrt.

§ 78. Normaler Lauf.

Bei geringen Werten der Schlüpfung $s$ (normaler Lauf) lässt sich angenähert schreiben:

$$J_1 = \frac{s + w_2 (g + jb)}{w_2} E_k$$

oder

$$J_1 = E_k \sqrt{\left(\frac{s}{w_2} + g\right)^2 + b^2} \qquad (130)$$

und

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{s^2 (x_2 + x_1) + w_2^2 b}{s w_2 + w_2^2 g} = \frac{s^2 \frac{x_2 + x_1}{w_2} + w_2 b}{s + w_2 g} \qquad (131)$$

und die Leistung

$$A_m = \frac{p' E_k^2 s}{w_2} \qquad (132)$$

Das Drehmoment

$$M = \frac{2 p p' E_k^2 s}{4 \pi n_1 w_2} \qquad (133)$$

oder

$$s = \frac{w_2 A_m}{p' E_k^2} = \frac{4 \pi n_1 w_2 M}{2 p p' E_k^2} \qquad (134)$$

GÖRGES hat in E. T. Z. 1895 eine Theorie der Induktionsmotoren angegeben, die sich etwas anders als die beiden genannten aufbaut und die in ihren Grundzügen an ähnliche Abhandlungen von POTIER erinnert. Dieselbe soll aber erst in dem Kapitel Einphasenmotoren behandelt werden.[1])

## e) Graphische Methoden.

Einen raschen und klaren Einblick in die Wirkungsweise eines Induktionsmotors gestatten die graphischen Methoden[2]), von denen eine ganze Reihe

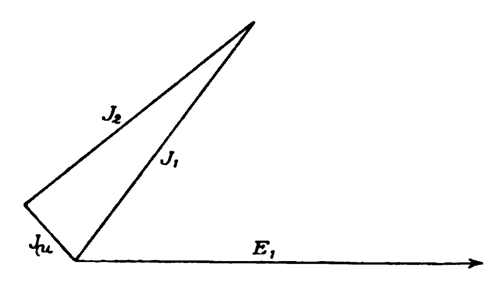



Fig. 134.

existieren. Die bemerkenswertesten Diagramme sind diejenigen von HEYLAND, BLONDEL, ROTHERT und BEHREND.

§ 79. Diagramm von Heyland.

HEYLAND hat sein Induktionsmotorendiagramm in E. T. Z. 1895, p. 649 niedergelegt und neuerdings in der Sammlung elektrotechnischer Vorträge

---

1) Siehe auch die analytischen Theorien der Induktionsmotoren von Professor ARNOLD, Zeitschr. für Elektr., Wien 1895 und VON CAHEN, E. T. Z. 1895, Heft 4 und 5.

2) In E. T. Z. 1900 sind unter „Briefe" von verschiedenen Seiten interessante kritische Erörterungen über Drehstrommotoren-Diagramme zu finden.

von E. VOIT, Band II ausführlich erörtert. An letzteren Aufsatz lehnen sich die nachstehenden Auseinandersetzungen an: Das Drehmoment ist proportional dem Produkt aus Ankerfeld und Schlüpfung oder aus Ankerfeld und Ankerstrom. Das Ankerfeld ist die Differenz aus dem primären Hauptfeld und dem Streufeld.[1]) Primärstrom $J_1$, Ankerstrom $J_2$ und Magnetisierungsstrom

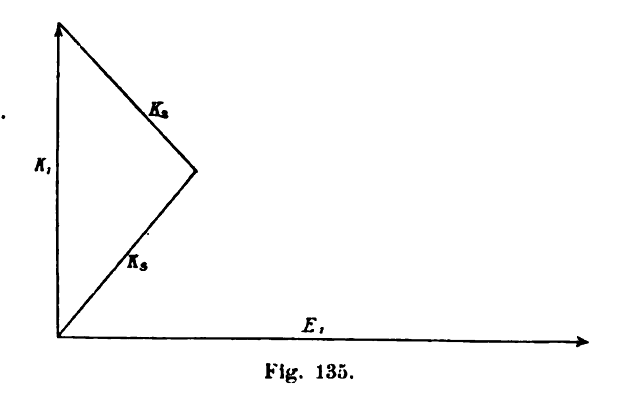



Fig. 135.

$J_\mu$ lassen sich wie beim Transformator nach Fig. 134 zusammensetzen. Für die Felder gilt das Dreieck Fig. 135. Das Streufeld $K_s$ hat die Richtung des Primärstromes $J_1$ und ist ihm proportional, das Hauptfeld $K_1$ steht senkrecht zur Spannung $E_1$. Die Resultierende ist das Ankerfeld $K_2$. Für verschiedene Werte von $K_2$ und $K_s$ ergiebt sich nun an Hand der Fig. 136 für die Dreieckspitze ein Halbkreis als geometrischer Ort. Es[2]) ist in Fig. 136

$$AD \cong K_1,\ AC' = J_1 \cong K_s \cong \frac{J_1}{W_{st}},\ C'D \cong K_2 \cong \frac{J_\mu}{W}.$$

$W_{st}$ ist der magnetische Streuwiderstand, $W$ der magnetische Widerstand des Ankerfeldes[3]) und $c'\,C' = J_2 \cdot c'$ und $C'$ wandern je auf einem Halbkreis, da $\sphericalangle\ A c' C = C C' D = 90^0$. Es ist nach Folgendem leicht einzusehen, dass

$$\frac{AD}{AC} = \frac{W_{st}}{W} = \text{magnetischer Widerstand des } \frac{\text{Streufeldes}}{\text{Ankerfeldes}}.$$

Der Primärstrom erreicht sein Maximum, wenn $C'$ auf $D$ fällt. $AC' = AD$ ist der sogenannte Kurzschlussstrom (bei Stillstand) des Motors. In diesem Falle ist

$$K_1 = K_s \cong \frac{J_1}{W_{st}} \cong \frac{AD}{W_{st}}.$$

Der Primärstrom ist ein Minimum, wenn $AC' = AC$, dann ist

$$J_1 = J_\mu = AC$$

und

$$K_1 = \frac{J_\mu}{W} \cong \frac{AC}{W}.$$

1) HEYLAND spricht nur von dem Streufeld als solchem, er trennt nicht in ein primäres und in ein sekundäres.

2) $\cong$ bedeutet proportional.

3) d. h. Widerstand des gesamten magnetischen Hauptkreises: Ständer, Luft, Läufer.

**Heyland** berücksichtigt nun in seinem Diagramm den **Ohm**schen Abfall der primären und sekundären Wicklung in folgender Weise. Der **Ohm**sche Abfall im primären Teil verursacht eine Reduktion der primären elektromotorischen Kraft und damit proportional eine solche des primären Hauptfeldes $K_1$, das bedeutet jedoch auch wieder eine ganz entsprechende Verminderung des Ankerfeldes $K_2$. Es wird also vom Ankerfeld $DC'$ ein Stück $C'E'$ abgezogen, das proportional dem primären **Ohm**schen Abfall ist und ferner ein Stück $E'F'$, das proportional dem **Ohm**schen Abfall im Sekundär-

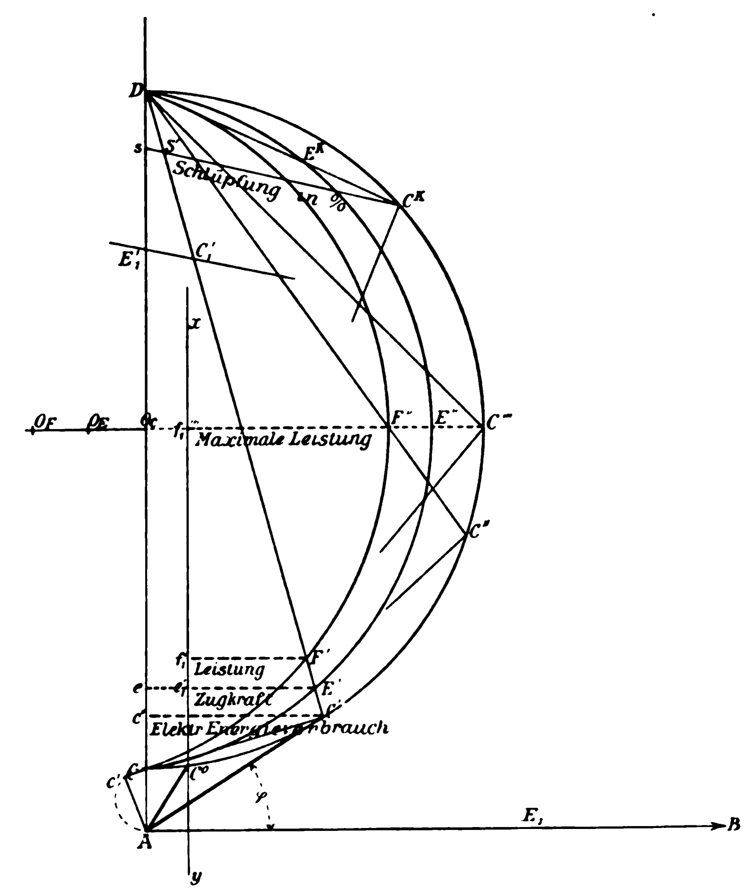



Fig. 136.

kreise ist. Alle Punkte $E'$ liegen wie die Punkte $C'$ auf einem Kreise und zwar mit dem Mittelpunkt $O_E$, ebenso die Punkte $F'$ auf einem Kreise aus $O_F$; die Radien sind für alle drei Kreise dieselben. Aus dem Diagramm lassen sich nun die wichtigen Grössen für den Motor ablesen:

1) Aufgenommene elektrische Energie $= \sqrt{3}\, E_k J_1 \cos\varphi \cong C'c''$ ($E_k$ konstante Klemmenspannung).

2) Zugkraft = Ankerfeld $\times J_2 \cong E'D \cdot C'c' \cong E'e$.

Dabei ist von der Lagerreibung und den Eisenverlusten abgesehen. Dieselben können jedoch durch ein konstantes Stück $ee'_1$ berücksichtigt werden, dann wird die nützliche Zugkraft $\cong e'_1\, E'$.

3) Die Leistung ist proportional $F' f_1'$.
4) Die Schlüpfung ist proportional

$$\frac{C' C}{E' D}.$$

Zieht man beliebig $E'_1 C_1'$, so dass $\sphericalangle\ D E'_1 C'_1 = D E' C$, so ist

$$E'_1 C_1 \cong \frac{C' C}{E' D},$$

d. h. proportional der Schlüpfung. Die Schlüpfung ist $100\,^0/_0$, wenn die Leistung Null wird, d. h. wenn $F'$ auf $D$ fällt. Dann kommt $C'$ nach $C_k$ so

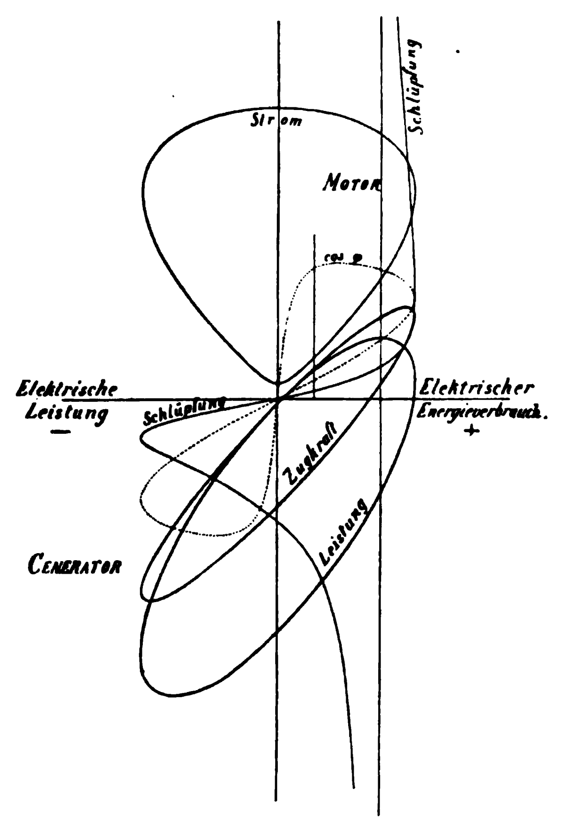



Fig. 137.

zu liegen, dass $D C_k$ Tangente an den Kreis $F'$ wird. Das Stück $s S'$ auf $s C_k \parallel E'_1 C'_1$ ist, falls $s C_k = 100\,^0/_0$, die Schlüpfung direkt in $^0/_0$.

Um das Diagramm für einen fertigen Motor zu konstruieren, ist zu messen:

1) Bei Leerlauf der Strom $A C_0$ primär und mit Hilfe des Wattmeters der $\sphericalangle\ C_0 A B$.
2) Bei Stillstand der Strom $A C_k = J_k$ primär und der $\sphericalangle\ C_k A B$.

Aus dem Ohmschen Widerstand $w_1$ der primären Wicklung findet man $C_k E_k \cong J_k \cdot w_1$. Damit sind die drei Mittelpunkte $O_C$, $O_E$, $O_F$ festgelegt, ebenso die Schlüpfungslinie $s C_k$.

In dem angezogenen Aufsatz wendet **Heyland** sein Diagramm auf eine Reihe Motoren an und zwar auch in ihrer Arbeitsweise als Induktionsgeneratoren, wozu die Teile der Kreise Fig. 136 zu benutzen sind, die auf der anderen Seite von $AD$ als gezeichnet liegen.

Besonders interessant sind die Kurven Fig. 137, die die Arbeitsweise einer Induktionsmaschine unter allen Verhältnissen erschöpfend darstellen. Die Abscissen stellen den elektrischen Effekt der Maschine dar, als Ordinaten sind gezeichnet: Strom $J_1$, Leistung, Zugkraft, Schlüpfung und cos $\varphi$.

§ 80. Diagramm von Blondel.

Das Drehstrommotorendiagramm von **Blondel**[1]) entspricht den Figg. 138 und 139. In Fig. 138 ist $OB = \nu_1 K_I$, das Feld, das durch die primären $AW$ an sich erzeugt würde; in den Anker tritt nur das Feld $K_I = OA$ über. $AB = K_I (\nu_1 - 1)$ bedeutet das primäre Streufeld. $AC_2$ ist das den Anker-$AW$ entsprechende Feld $\nu_2 K_2$, wovon nur $BC_1 = K_{II}$ in den primären Teil übertritt. $AC_2 - BC_1 = K_{II} (\nu_2 - 1)$ ist das sekundäre Streufeld. Thatsächlich tritt dann primär auf $K_1 = OC_1$ und sekundär $K_2 = OC_2$. Zwischen den Winkeln $\beta$ und $\Theta$ besteht die Beziehung

Fig. 138.

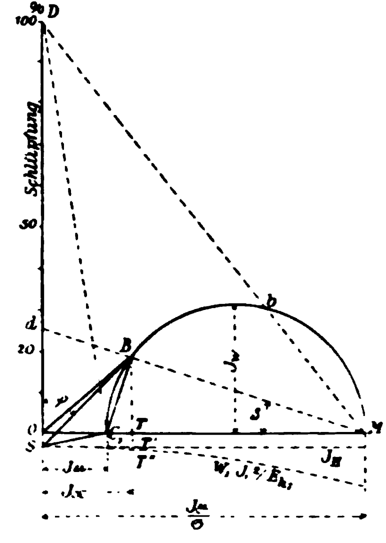


Fig. 139.

$$\operatorname{tg} \beta = \left(1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2}\right) \operatorname{tg} \Theta = \sigma' \operatorname{tg} \Theta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (135)$$

Aus Fig. 138 entwickelt sich in einfacher Weise das Diagramm Fig. 139[2]), worin $OC_1 = J_a$ der Magnetisierungsstrom $\sim K_1$, $C_1 B = J_2$ der sekundäre Strom, $OB = J'_1$ der Primärstrom ohne Rücksicht auf Eisenverluste, $OS = J_H$ die Stromkomponente für die Eisenverluste, $J_1 = SB$ der Primärstrom einschliesslich Eisenverluste und $OM$ der ideelle Kurzschlussstrom $J_k$ bei den Widerständen $= 0$ und $OD$ die Richtung der Spannung ist. Es gilt

$$OM = J_k = \frac{J_a}{\sigma} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 136$$

Der primäre Strom $SB$ ist in zwei Komponenten, in eine wattlose $OT = J_{[illegible]}$ und in eine Wattkomponente $BT'' = BT - TT' - T'T''$ zerlegt.

1) E. T. Z. [illegible] p. [illegible]

2) [illegible]

$TT'$ überwindet die Eisenverluste, $T'T''$ die Kupferverluste, $BT = J_w$ bleibt für die Nutzarbeit übrig. Die Schlüpfung lässt sich auf der Vertikalen $OD$ in $^0/_0$ ablesen. $Ob$ ist der primäre Anlassstrom, d. h. der Strom bei $100\,^0/_0$ Schlüpfung.

Es lässt sich leicht zeigen, dass

$$Od = \frac{J_\mu}{\sigma'} \operatorname{tg} \beta = J_\mu \times \operatorname{tg} \Theta$$

$$= J_\mu\, s\, \frac{\omega_1 L_2}{w_2} = c \cdot s$$

falls $s$ die prozentuelle Schlüpfung, $\omega_1 = 2\pi n_1$, $L_2$ und $w_2$ Selbstinduktionskoeffizient und Widerstand des Ankers sind.

Ferner ist

$$\operatorname{tg}(OCD) = \frac{\omega_1 L_2}{w_2}.$$

§ 81. Vollständiges Diagramm.

Schliesslich weise ich noch auf das Diagramm[1]) Fig. 140 hin, das auf dem Diagramm Fig. 141 für Drehstromgeneratoren aufgebaut ist.[2]) In Fig. 140

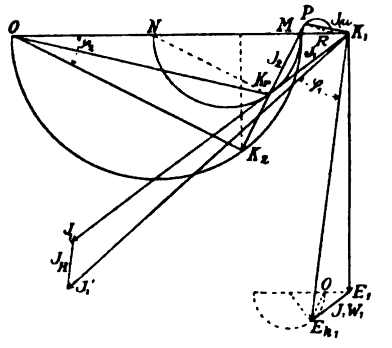



Fig. 140.

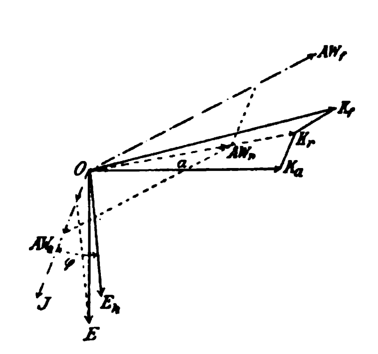



Fig. 141.

ist $PK_1 = J_\mu$ (primärer Magnetisierungsstrom), $K_1K_r = J_1$ (primärer Strom), $PK_r = MK_r\,(1 + \tau_1)$[3]) $= J_2$ (Ankerstrom). $MK_1$ ist der Magnetisierungsstrom

1) Des Verfassers Werk über Hebe- und Transportmaschinen p. 94 entnommen.

2) Handbuch f. E. Bd. IV, p. 111. Fig. 141 ist für den Motor folgendermassen zu deuten: $K_a$ ist das Ankerfeld, $K_f$ das Ständerfeld, $K_r$ das Luftfeld, $K_a K_r$ das Ankerstreufeld, $K_r K_f$ das Ständerstreufeld. $AW_f$ bedeuten die Ständer-$AW$

$$= 2{,}12\; C \frac{J_1 Z_1}{4p},$$

$AW_a$ die Anker-$AW$

$$= 2{,}12\; C \frac{J_2 Z_2}{4p}$$

und $AW_r$ sind die resultierenden-$AW$

$$= 2{,}12\; C \frac{J_\mu Z_1}{4p}.$$

Der Winkel $\varphi$ kann gleich Null gesetzt werden, $J$ bedeutet den Ankerstrom $J_2$, $E$ ist die Anker-EMK $E_2$ und $E_k$ ist bei kurzgeschlossenem Läufer = Null. In Fig. 140 ist die Gerade $OK_f$ der Fig. 141 als Basis $OK_1$ benützt. $K_1K_r$ (Fig. 140) = $K_fK_r$ (Fig. 141) etc.

3) $\tau_1$ der primäre Streufaktor siehe später.

bei Leerlauf, während $PK_1$ entsprechend der Belastung variiert. $K_1 N = J_k$ (ideeller Kurzschlussstrom bei den Widerständen Null). $K_1 O$ stellt in besonderem Massstab das Primärfeld $K_1$ bezw. gleichzeitig die Grösse der primären EMK $E_1$ dar. $OK_2$ ist das Ankerfeld, $K_1 K_r$ das primäre, $K_r K_2$ das sekundäre Streufeld; in gleichem Massstab gilt dann $MK_1$ als primäres Streufeld bei Leerlauf. Der Punkt $K_r$ wandert auf dem sogenannten Stromkreis, $K_2$ auf dem Feld-(Spannungs-)kreis. $P$ liegt ebenfalls auf einem kleinen Halbkreis. Aus $J_1$ findet man den totalen Primärstrom $J'_1$, indem man in richtiger

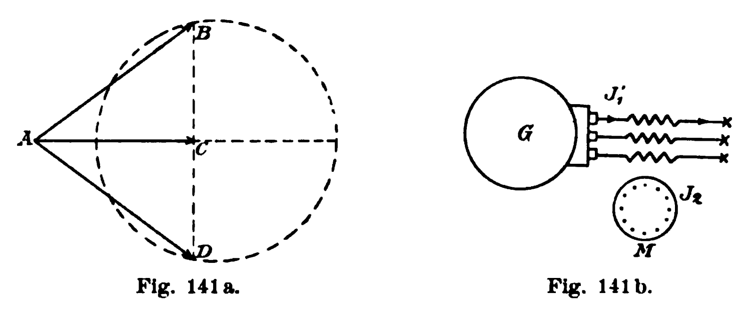



Fig. 141 a. Fig. 141 b.

Phase $J_H$ für die Eisenverluste zuschlägt. Aus der elektromotorischen Kraft $E_1$ ergiebt sich die Klemmenspannung $E_{k_1}$, wenn man den Ohmschen Abfall $J_1 W_1$ im Diagramm zuschlägt. $E_{k_1}$ wird allerdings thatsächlich konstant sein, so dass die übrigen Grössen bei jeder Belastung entsprechend reduziert

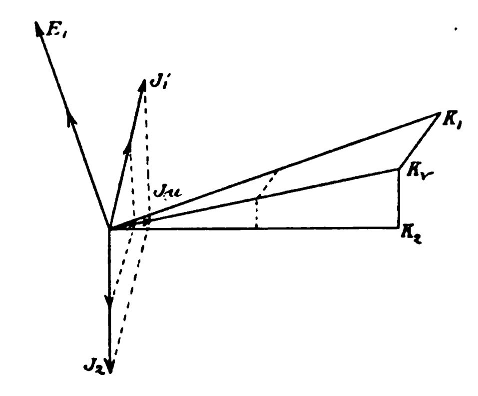



Fig. 141 c.

werden müssen. Betreffs weiterer Einzelheiten siehe das bereits citierte Werk des Verfassers.

Ist $J_k'$ der bei Stillstand einem Motor zugeführte Strom bei der Klemmenspannung $E_k$ und einem Wattverbrauch von $A_k$, so ist der ideelle Kurzschlussstrom $J_k$

$$J_k = \sqrt{J_k'^2 - \frac{A_k^2}{3E_k^2}} + \frac{A_k^2}{3\,E_k^2\left[\sqrt{J_k'^2 - \frac{A_k^2}{3E_k^2}} - J_\mu\right]}$$

§ 82. Induktionsgenerator.

Die Arbeitsweise des Induktionsmotors als Generator geht in einfacher Weise aus den gegebenen Diagrammen hervor. Für den ideellen Fall gilt das Kreisdiagramm Fig. 141a, worin $AB$ der Primärstrom als Induktions-

motor und $AD$ derjenige für den Generator ist. Das Diagramm zeigt deutlich, dass der Induktionsgenerator wohl von Wattströmen ($BC$ und $CD$) in verschiedener Richtung durchflossen werden kann, während die wattlose Komponente $AC$ stets ihre Richtung beibehält, d. h. der Induktionsgenerator kann wohl Wattströme abgeben, aber wattlose nur aufnehmen. Für die Wirkungsweise des Induktionsmotors als Zusatzdynamo (Fig. 141 b) gilt das Diagramm Fig. 141 c: Der Anker $M$ werde mit der übersynchronen Geschwindigkeit $n_2$ angetrieben. Es sei

$$n_2 - n_1 = + n_s.$$

Falls alle Grössen auf gleiche Windungszahl reduziert sind, wird

$$J_2 w_2 = 2{,}1\, n_s Z_2 K_2 \cdot 10^{-8}.$$

$K_2$ und zuzüglich der Streufelder die Werte $K_r$ und $K_1$ ergeben einen bestimmten Magnetisierungsstrom $J_\mu$, der mit $J_2$ zusammengesetzt zu $J'_1$ führt. Die Zusatzspannung $E_1$ steht senkrecht zu $K_1$ und

$$E_1 = 2{,}1\, n_1 Z_1 N_1 \cdot 10^{-8}.$$

Für variable $J'_1$ verändert sich das Diagramm nach einem System paralleler Linien (ähnliche Figuren), was ohne weiteres erklärt, dass bei konstantem $n_s$ die Zusatzspannung $E_1$ mit $J'_1$ wächst. Aber $E_1$ ist auch unabhängig von $n_s$, $E_1$ wächst immer, wie auch $n_s$ sich ändert, falls die Eisensättigungen nicht zu hoch werden, proportional $J'_1$, da $E_1$ annähernd $\sim J_2 w_2 \sim J_2 \sim J_1'$. Umgekehrt proportional $n_s$ ändert sich $K_2$, $K_r$, $K_1$.[1])

## f) Beziehungen für die Schlüpfung, für $(\cos \varphi)_{max}$. Überlastungsfähigkeit.

§ 83. Schlüpfung.

An die besprochenen Diagramme lassen sich noch einige für die Praxis wichtige Erörterungen knüpfen. Für die Schlüpfung $n_s$ ergiebt sich

$$\frac{n_s}{n_1} = \frac{3 J_2^2 W_2}{A_m + 3 J_2^2 W_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (137)$$

($A_m$ mechanische Leistung incl. Lagerreibung in Watt.)

§ 84. Maximaler Leistungsfaktor.

Der grösste Leistungsfaktor $(\cos \varphi_1)_{max}$ findet sich aus dem Diagramm, wenn z. B. in Fig. 140 $K_1 K_r$ den Stromkreis berührt, d. h.

$$(\cos \varphi_1)_{max} = \frac{J_k - J_\mu}{J_k + J_\mu} = \frac{1 - \sigma'}{1 + \sigma'} = \frac{1}{2\sigma + 1} \quad \ldots \quad (138)$$

Dieser Wert wird thatsächlich durch das Vorhandensein von $J_H$ und $J_1 W_1$ noch etwas erhöht (Eisen- und Kupferverluste).

---

1) Die Theorie des Induktionsgenerators siehe STEINMETZ, Alternating current phenomena, 3d ed., p. 265 ff.

Dabei ist
$$\sigma' = \frac{J_\mu}{J_k}$$
und
$$\sigma = \frac{J_\mu}{J_k - J_\mu}.$$

Der Strom bei $(\cos \varphi_1)_{max}$ ist
$$J_1 = \sqrt{J_k J_\mu}.$$

§ 85. Überlastungsfähigkeit. Von Interesse ist die sogenannte Überlastungsfähigkeit eines Motors, d. h. die Belastung, bei der er abfällt. In Fig. 136 ist die maximale Leistung als Scheitellot $f_1''' F''$ des untersten Kreises, die maximale Zugkraft als Scheitellot $f_1''' E''$ des mittleren Kreises und der maximale Effektverbrauch als Scheitellot $O_c C''$ des obersten Kreises dargestellt. Nennt man diejenige Leistung normal, bei der $\cos \varphi_1 = (\cos \varphi_1)_{max}$, so ergiebt sich für den Überlastungsfaktor
$$U = \frac{\text{Maximalleistung}}{\text{Leistung bei } (\cos \varphi_1)_{max}}$$
angenähert[1]), d. h. für einen ideellen Motor ohne Verluste
$$U = \frac{J_k + J_\mu}{2\sqrt{J_\mu J_k}} = \sim \frac{1}{2}\sqrt{\frac{J_k}{J_\mu}} = \frac{1 + \sigma'}{2\sqrt{\sigma'}} = \sim \frac{1}{2}\sqrt{1 + \frac{1}{\sigma'}} \quad . \quad (139)$$

Bezieht[2]) man die Überlastungsfähigkeit $U'$ auf irgend einen normalen Strom
$$J_m = \frac{1}{a}\sqrt{J_k J_\mu},$$
so wird, falls $J_\mu = b J_m$,
$$U' = \frac{1}{2b}(a + b)(a - b).$$

$U'$ wird um so grösser, je kleiner $a$ ist, d. h. je früher der normale Strom $J_m$ vor dem Werte des Stromes liegt, bei dem $\cos \varphi$ ein Maximum wird, d. h. der Abfallwert ist um so grösser, je besser die Streuungsverhältnisse bezw. $(\cos \varphi)_{max}$ sind und je höher der Motor magnetisiert wird, letzteres geht allerdings auf Kosten eines hohen Leerstroms.

G. Kapp giebt für das grösste Moment $M_{max}$:
$$M_{max} = \frac{M_n J_\mu}{2\sigma J_1 \cos \varphi_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (140)$$
falls $J_1 \cos \varphi_1$ die Wattkomponente ist, die zum normalen Moment $M_n$ gehört.

Nach Breslauer E. T. Z. 1900 giebt nachstehende Tabelle den Zusammenhang zwischen $\sigma$, dem maximal möglichen $\cos \varphi$ und dem Überlastungsfaktor $U$

1) Dabei ist ausser Acht gelassen, dass der Wirkungsgrad beim Abfall verhältnismässig gering ist, so dass der thatsächliche Überlastungsfaktor bis auf die Hälfte obigen Wertes sinken kann.

2) Von Dr. Fleischmann angegeben.

| $\sigma$ | $(\cos\varphi)_{max}$ | $U$ |
|---|---|---|
| 0 | 1,00 | $\infty$ |
| 0,02 | 0,96 | 3,6 |
| 0,03 | 0,94 | 2,98 |
| 0,05 | 0,905 | 2,35 |
| 0,06 | 0,889 | 2,16 |
| 0,07 | 0,870 | 2,03 |
| 0,08 | 0,852 | 1,91 |
| 0,09 | 0,834 | 1,82 |
| 0,10 | 0,820 | 1,74 |
| 0,15 | 0,739 | 1,48 |
| 0,20 | 0,668 | 1,34 |
| 0,25 | 0,602 | 1,25 |
| 0,30 | 0,540 | 1,19 |
| 0,40 | 0,430 | 1,10 |

Je grösser[1]) der Luftspalt $\delta$ ist, desto kleiner fällt der $(\cos\varphi)_{max}$ aus, $J_k$ bleibt bei verschiedener Luft annähernd gleich, wird eher etwas grösser, aber $J_\mu$ steigt mit der Luft. $A_{max}$, d. h. $U$ verändert sich wenig mit dem Luftspalt. Der $(\cos\varphi)_{max}$ wird mit grösser werdendem Durchmesser (grösserer Polteilung) auch grösser. Sucht man dasselbe Motormodell für verschiedene Polzahlen durchzurechnen, so findet man, dass mit zunehmender Polzahl der $(\cos\varphi)_{max}$ und die Maximalleistung $A_{max}$ kleiner werden, $J_\mu$ bleibt ungefähr konstant und $J_k$ fällt sehr stark. Je höher die Periodenzahl ist, für die man ein Motormodell verwenden will, desto kleiner wird $(\cos\varphi)_{max}$, da $J_\mu$ mit der Periodenzahl steigt und $J_k$ nur wenig zunimmt. Der Abfallswert bleibt ungefähr derselbe. Es ist z. B.

| Periodenzahl | $\cos\varphi_{max}$ |
|---|---|
| 25 | 0.91 |
| 50 | 0.83 |
| 100 | 0.71 |

Spitze Spannungskurven verschlechtern Drehstrommotoren.

## g) Wirkungsgrad.

§ 86. Wirkungsgrad allgemein.

Der Wirkungsgrad[2]) eines Drehstrommotors berechnet sich aus

$$\eta = \frac{\text{Nutzleistung } A_m}{A_m + \text{Kupferverluste i. Ständer u. Läufer} + \text{Eisenverluste i. St. u. L.} + \text{Lager-, Bürsten- u. Luftreibung}} \quad (141)$$

---

1) Teilweise nach BEHREND El. World 1900.

2) Die Eisenverluste von Drehstrommotoren sind grösser als bei Transformatoren, a) da es sich um drehende Magnetisierung handelt, b) da die vielen Nutenöffnungen zu Wirbelströmen Veranlassung geben, deren Periodenzahl mehrere Hundert ist. Diese letzten Verluste sind um so grösser je grösser die Nutenzahl, je kleiner der Luftspalt und je grösser die Nutenöffnung ist. Überdies kommt eine nennenswerte zusätzliche Reibung in Frage. Die Leerverluste macht man gleich

Die Kupferverluste $3 J_2^2 W_2$ im Läufer sind proportional der Schlüpfung $s$, d. h. angenähert[1]) $= A_m s$. Dann kann man als Annäherung setzen

$$\eta = \frac{A_m}{A_m (1 + s) + \text{Leerlaufverluste } A_l + \text{Kupferverluste im Ständer}} \qquad (142)$$

Bei der Belastung $A$ Watt (zugeführt) sei der Wirkungsgrad $\eta$ und $\cos \varphi$ bekannt, das Verhältnis

$$\frac{\text{Kupferverluste}}{\text{Konstante Verluste } A_c} \text{ bei } A \text{ sei } = c;$$

dann[2]) ist $\eta_x$ bei irgend einer Belastung $\frac{A}{x}$ und bei $\cos \varphi_x$

$$\eta_x = 1 - \frac{1-\eta}{1+c} \left\{ x + \frac{c}{x} \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_x} \right)^2 \right\}.$$

§ 87. Leerverluste. $A_l$ lässt sich nach BRAUN E. T. Z. 1899 aus der Schlüpfung $n_{s0}$ bei Leerlauf und der Schlüpfung $n_s$ bei der Belastung $A_m$ bestimmen zu

$$A_l = \frac{A_m}{\frac{K_1^2}{K_{l\,1}^2} \frac{n_s (n_1 - n_s)}{n_{s0} (n_1 - n_{s0})} - 1} \quad \ldots \ldots \quad (143)$$

oder prozentuell

$$A_l = \frac{A_m}{\frac{K_1^2}{K_{l\,1}^2} \frac{s_0 (100 - s)}{s (100 - s_0)} - 1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (144)$$

$K_1$ ist das Primärfeld bei Volllast, $K_{l\,1}$ bei Leerlauf.

## h) Leistung in Abhängigkeit der Abmessungen.

§ 88. Formel für $d^2 l$. In ähnlicher Weise wie in Band IV die Leistung der Generatoren in Abhängigkeit der Dimensionen $d$ und $l$ gegeben wurde, ist für Drehstrommotoren

$$A_m^{PS} = C d^2 l u \cdot 10^{-6} = C_x (d^2 l)^x \cdot u \cdot 10^{-6} \quad . \; . \quad (145)$$

$$\frac{\text{Kupferverluste}}{1^1/_4 \text{ bis } 2}.$$

Die Wirbelstromverluste berechnet Dr. BENISCHKE (E. T. Z. 1901, S. 57) zu $\beta n^2 B^2_{max}$, wobei

$$\beta = 15 d^2 \sigma_e (1 - \alpha t),$$

worin $d$ die Blechstärke in mm, $\sigma_e$ der Scheitelfaktor

$$= \frac{\text{Maximum}}{\text{Effektivwert}}$$

der Spannungskurve, $t$ die Temperatur und $\alpha$ (= 0,0048) der Temperaturkoeffizient ist. Es wäre also $\beta$ von $\sigma_e$ und nicht vom Formfaktor

$$\frac{\text{Effektivwert}}{\text{Mittelwert}}$$

abhängig zu machen.

1) Genauer $\cong$ ($A_m$ + Reibungs- + Läuferverluste) $s$.
2) Von Dr. FLEISCHMANN angegeben.

wobei $C$ für kleinere Motoren 0,4—0,6, für grosse 0,7—1,4 ist. Für $x = 1,2$ bis 1,4 wird $C_x$ annähernd konstant für alle Durchmesser derselben Konstruktion. Für den Verlauf von $C$ in Abhängigkeit von $A_m$ kann die Kurve Fig. 142 benutzt werden. Man kann auch setzen

$$A_m = c' \cdot (d_a{}^2 - d_i{}^2)\, l \cdot u,$$

wenn $d_a$ der äussere Statordurchmesser und $d_i$ der innere Rotordurchmesser ist. Am besten ist die kg aktives Eisen pro PS und die kg Kupfer pro PS

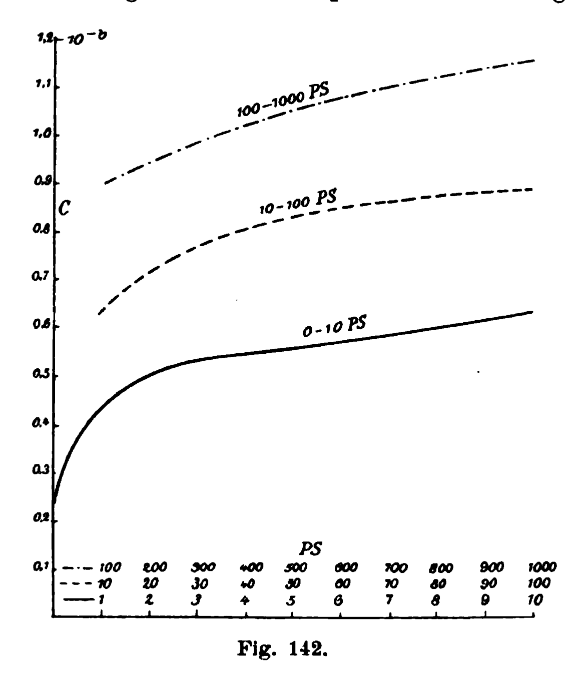



Fig. 142.

zu ermitteln. $\frac{l}{d}$ wählt man, wenn nicht die Umfangsgeschwindigkeit und konstruktive Gründe dagegen sprechen zwischen $\frac{\pi}{2}$ und $\frac{\pi}{4}$; wenn man darunter geht, so wird die Stirnstreuung sehr gross und zudem nimmt der Motor einen fast scheibenartigen Charakter an, der viel Konstruktionsmaterial bei wenig aktivem Material erheischt und häufig auch nicht stabil ist. Grosse Leistung und hohe Tourenzahl geben grössere Motorlängen $l$ bei gleich günstigen elektrischen Verhältnissen. Kleine Leistung und kleine Tourenzahl besonders bei hoher Periodenzahl führen zu schmalen Motoren mit schlechtem $\cos\varphi$, schlechtem $\eta$ und grossem $J_\mu$. Ein Drehstrommotor unter 100 PS und unter 100 Touren ist bei 50 Perioden beinahe eine Unmöglichkeit.

§ 89. Verhältnis $\frac{l}{d}$.

## i) Betriebskurven.[1]

Aus einem der Diagramme oder einer der angegebenen Theorien oder durch direkte Aufnahme lassen sich eine Reihe Betriebskurven ermitteln, die

§ 90. Kurven für $M$, $J_1$, $\cos\varphi$ $s$ etc.

1) Ich heisse nachstehende Kurven Betriebskurven, weil sie die charakteristischen Kurven der Motoren bei verschiedenen Betriebsarten darstellen.

einen bequemen Einblick in die Arbeitsweise des Drehstrommotors liefern. In Fig. 143[1]) sind für einen achtpoligen Motor von 20 PS in Abhängigkeit der Tourenzahl die Momente $M$ bei verschiedenen Ankerwiderständen dargestellt. Die Stromkurve hat als Ordinaten die Momente, als Abscissen die Strom-

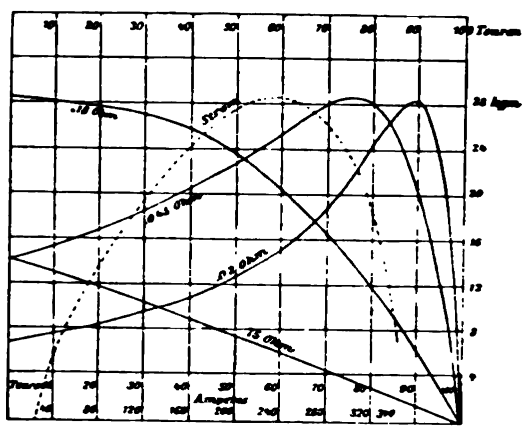


Fig. 143.

werte. Die äussersten Ordinaten links sind je die Anzugsmomente.[2]) Leistungsfaktor cos $\varphi$, Wirkungsgrad $\eta$ und scheinbarer Wirkungsgrad $\eta$ cos $\varphi$ verlaufen für einen 12 PS-Motor[3]) nach Fig. 144 (Westinghouse Co.). Der Touren-

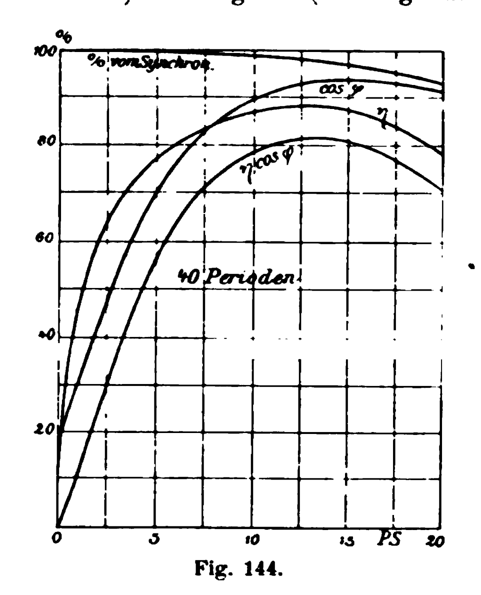



Fig. 144.

abfall ist in Prozenten des Synchronismus aufgetragen. BEHREND hat auf Grund seines Diagramms E. T. Z. 1896 die Kurven Fig. 145 entwickelt, welche den

1) Nach STEINMETZ „Alternating Current Phenomena".

2) Das maximale Moment ist unabhängig vom Ankerwiderstand stets dasselbe, es tritt nur bei anderer Schlüpfung auf. Jedes Moment ist bei zwei verschiedenen Touren möglich, alle Tourenzahlen für Momente zwischen Anzug und $M_{max}$ entsprechen einem labilen Zustand des Motors.

3) Nach ATKINSON.

Primärstrom $J_1$, den Wirkungsgrad $\eta$, $\cos \varphi_1$, den Effektverbrauch, die Zugkraft und die Leistung in Abhängigkeit der Schlüpfung zeigen. In Abhängigkeit des zugeführten Stromes sind in Fig. 146[1]) zunächst gegeben: Das Drehmoment und die geleisteten Pferdestärken (PS). Die obere gestrichelte Linie zeigt die Tourenzahl in Funktion des Stromes, die untere den allmählichen Abfall des Primärfeldes $K_1$ mit zunehmendem Strom $J_1$.

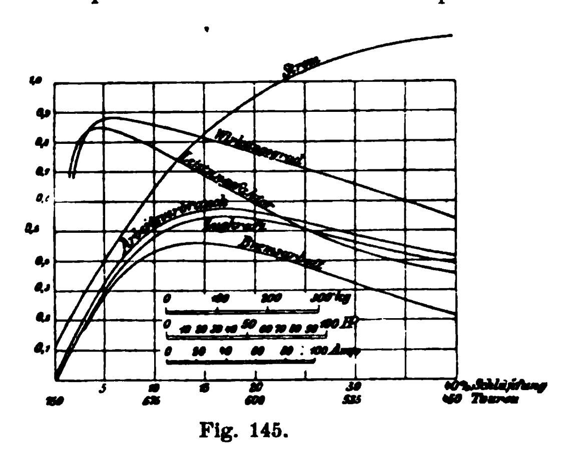



Fig. 145.

Schaltet man in den Anker zusätzlichen Widerstand, so ändert sich das Anzugsmoment $M$ nach Fig. 147, die leicht aus Fig. 143 zu entwickeln ist. Der Strom $J_1$ wird entsprechend reduziert. Schaltet man aber Widerstand in

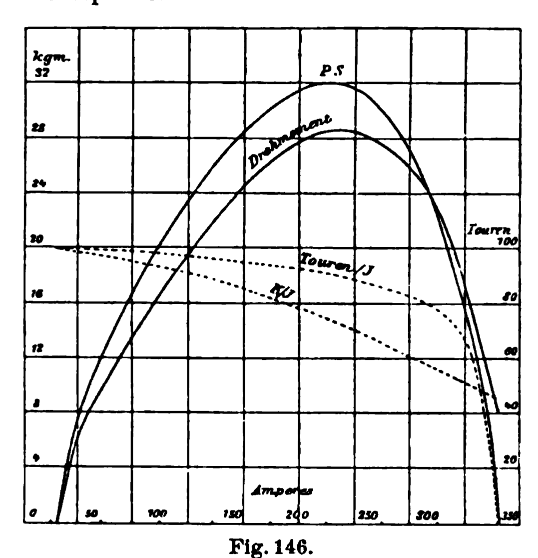



Fig. 146.

die Primärleitung zwecks Spannungsverminderung, so nimmt das Moment $M$ gemäss Fig. 148 rasch ab. Der primäre Strom wird dabei ebenfalls, aber zugleich auch $M$ reduziert, da $M$ annähernd proportional dem Quadrat der Klemmenspannung ist.

In Fig. 149 sind die Kurven für einen 10 PS-Motor (1500 Touren) der Firma Siemens & Halske A.-G. niedergelegt. Der maximale $\cos \varphi_1$ ist 0,92,

1) Nach Steinmetz.

der maximale Wirkungsgrad 0,83, die Überlastung 1,9fach. Der Leerlaufstrom beträgt nur $^1/_4$ des normalen, die Schlüpfung bei Volllast ca. $3\,^0/_0$.

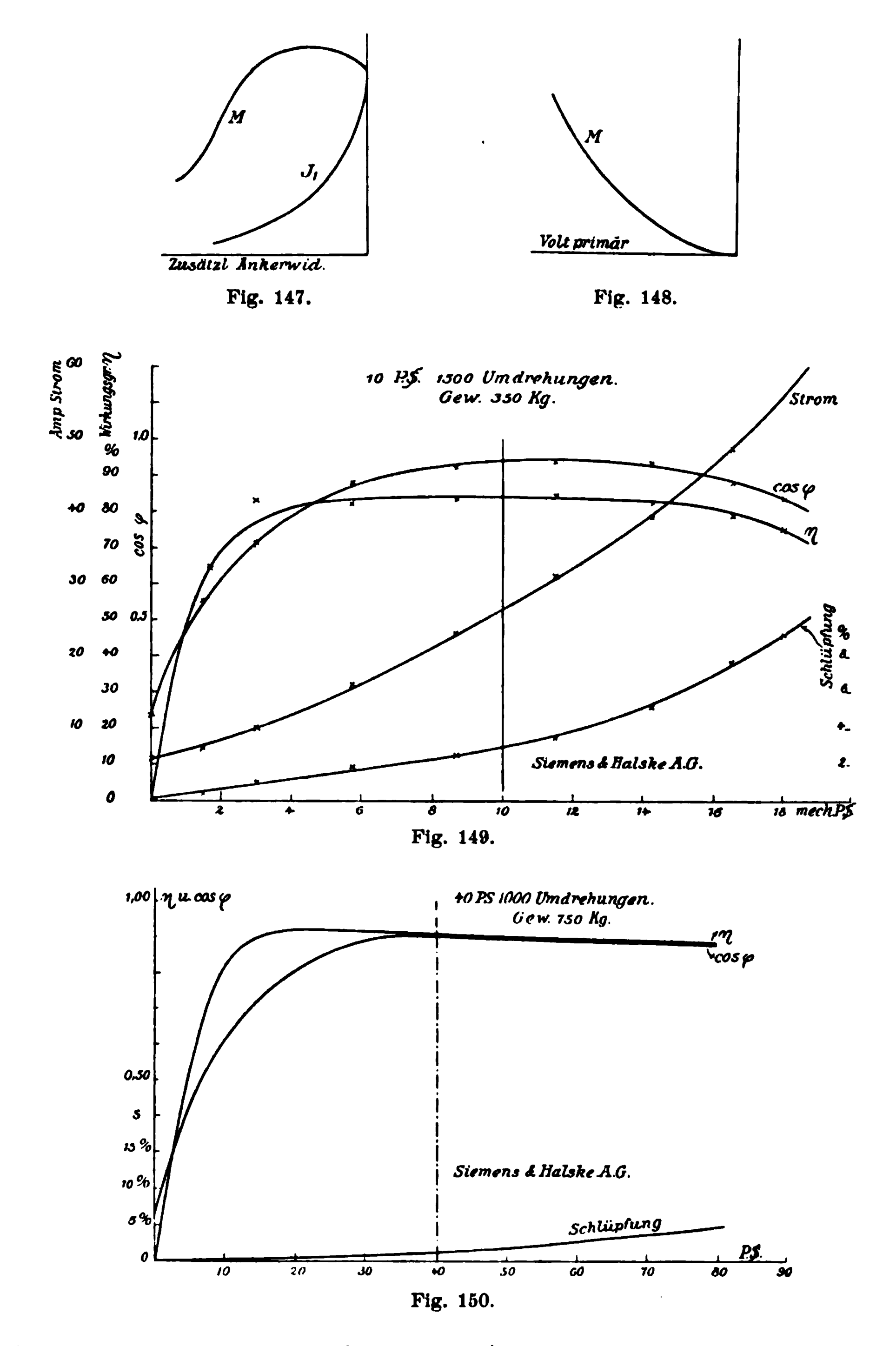



Fig. 147.

Fig. 148.

Fig. 149.

Fig. 150.

Für einen 40pferdigen Motor (1000 Touren) derselben Firma gelten die Kurven Fig. 150.

Das Verhalten eines 12pferdigen Motors der E. A.-G. Helios-Köln ist in Fig. 151 niedergelegt. Beachtenswert sind die Kurven des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors für einen 1pferdigen und einen 5pferdigen Motor

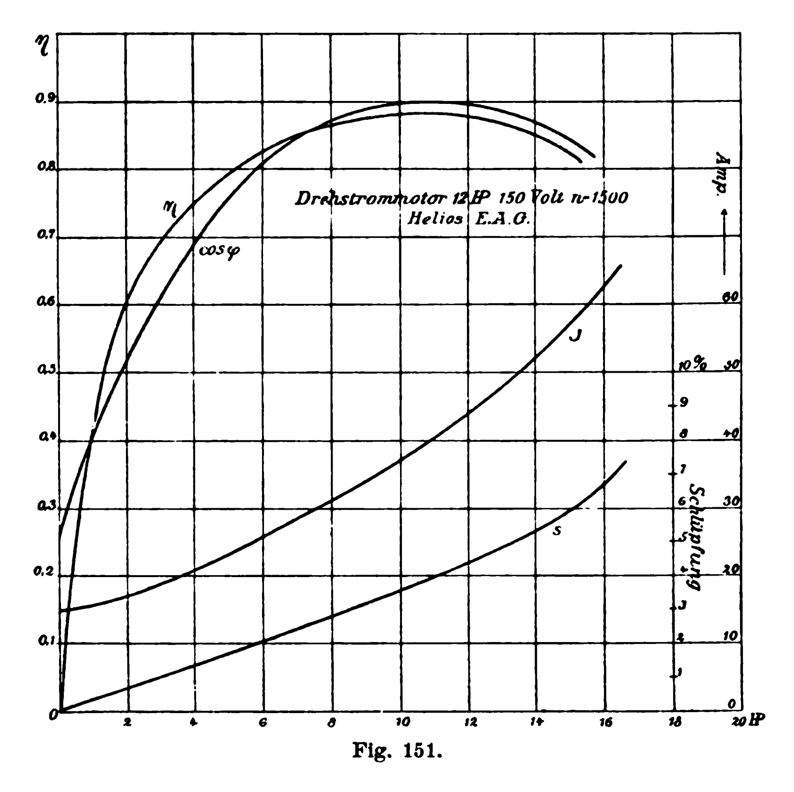



Fig. 151.

der A. E.-G.-Berlin (Fig. 152—155). Es ist namentlich der flache Verlauf zwischen $^1/_2$ und $1^1/_2$facher Last hervorzuheben. cos $\varphi$ erreicht maximal

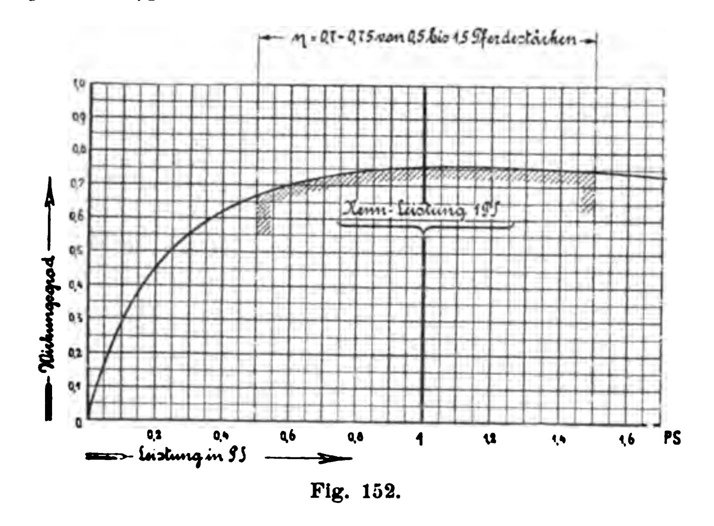



Fig. 152.

etwa 0,93—0,94. Mehr wie 0,95—0,96 ist überhaupt nicht zu erreichen, sofern der Motor konkurrenzfähig bleiben soll und man von besonderen phasenverschiebenden Hilfsapparaten absieht. Die beiden eben genannten A. E.-G.-

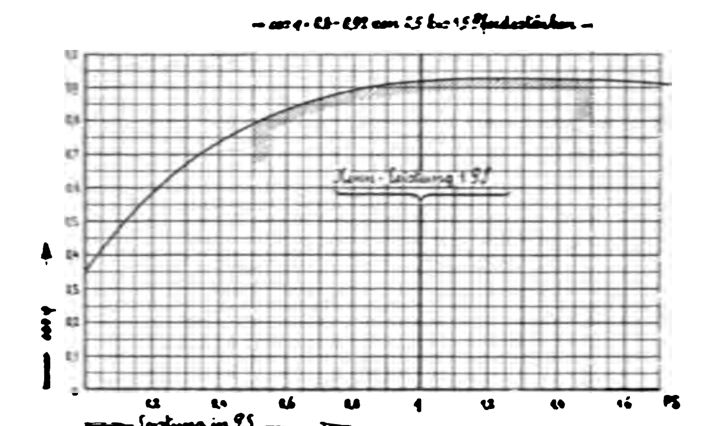


Fig. 153.

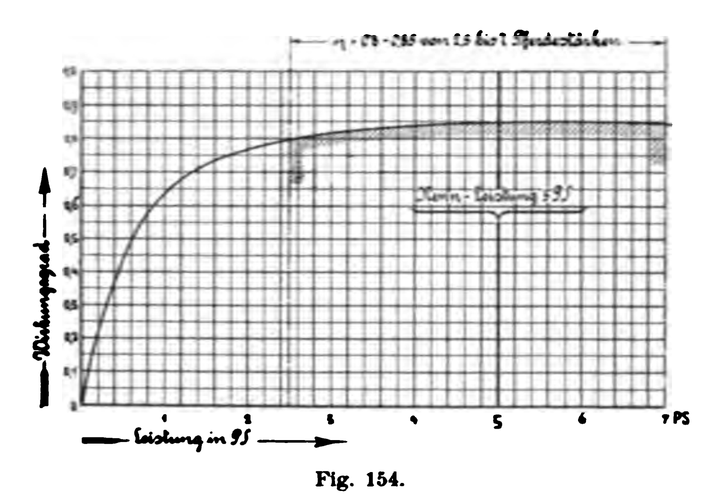


Fig. 154.

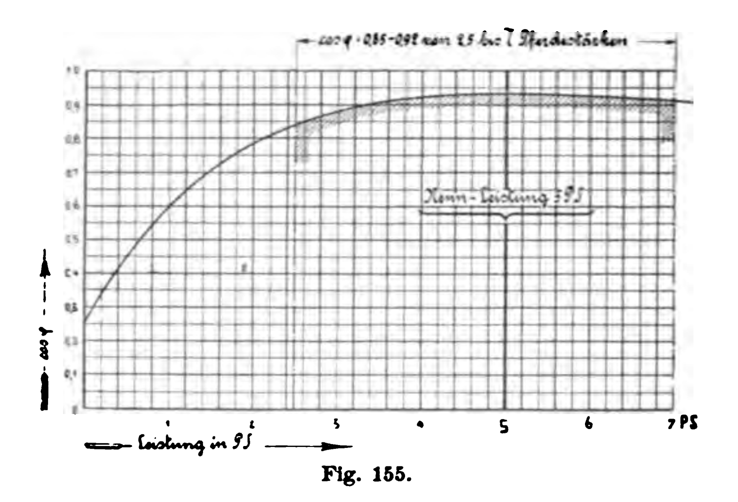


Fig. 155.

Motoren haben Kurzschlussläufer, wobei der cos $\varphi$ meist $^1/_2$—$2^0/_0$ grösser ist als bei gewickelten Ankern. Die letzterwähnte Firma baut ihre Drehstrommotoren für Abfallswerte gleich der $2^1/_2$fachen Normallast. Dieselben ziehen bei $^2/_3$ der vollen Spannung noch die Normallast durch. Der Leerstrom ist etwa $^1/_3$ des vollen.

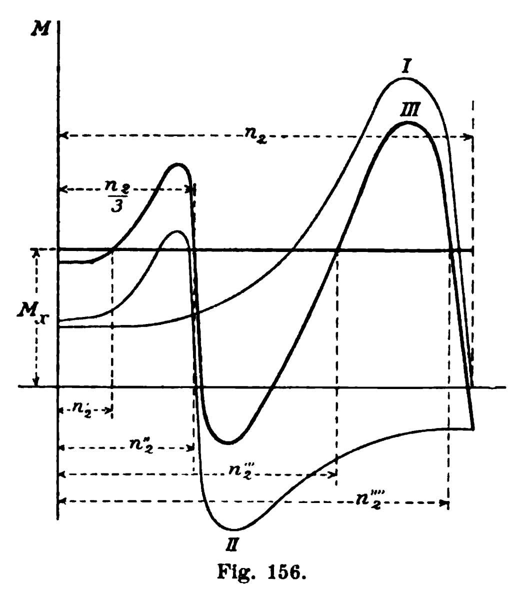


Fig. 156.

In Betreff der Momentenkurven Fig. 143 ist noch zu bemerken, dass dieselben hin und wieder besonders bei Kurzschlussankern oder bei Gegenschaltung einen etwas unregelmässigen Verlauf haben. Es rührt dies daher, dass das Kraftlinienfeld des Motors nicht sinusförmig verläuft. In diesen Fällen kann man sich nach FOURIER das Drehfeld in Einzelfelder zerlegen

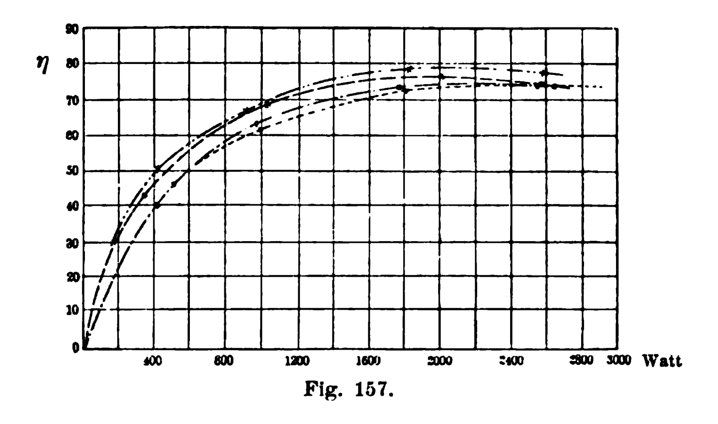


Fig. 157.

mit den Perioden $n_1$, $3n_1$, $5n_1$ .... und für jedes Einzelfeld die Momentenkurve ermitteln, siehe Fig. 156 (F. NIETHAMMER, E. T. Z. 1898, p. 749). Die Momentenkurve I hat die Periode $n_1$, die Kurve II die Periode $n_3$. III ist die resultierende Momentenkurve, welche zwei Höcker und dazwischen eine Einsenkung hat. Der Motoranker läuft stabil bei ungefähr $n_2''$ und $n_2''''$ Touren, bei $n_2'$ und $n_2'''$ ist er in labilem Zustande.

windungen und der Leitfähigkeit des Streupfades. Die letztere setzt sich z. B. für das primäre Streufeld zusammen:

1) aus der magnetischen Leitfähigkeit für die Streulinien durch den grösseren Teil der Statornute bezw. der verschiedenen Statornuten selbst;
2) aus derjenigen durch die Statornutenschlitze;
3) aus derjenigen für die Streulinien, die im Luftzwischenraum entlang gehen;
4) aus derjenigen durch die Rotorstege und -Nuten (gering);
5) aus derjenigen um die Stirnverbindungen herum.

Für die Nutenform (Fig. 161) ergiebt sich damit für das primäre Streufeld[1]):

$$K'_s = \frac{c}{p} J_1 Z_1 \left[ \int_0^{b_1} \left(1 - \frac{b}{b_1}\right) \frac{db}{q_1 g} + \frac{e}{q_1 d} + \frac{\delta}{q_1 (s_f + d) + \delta} \right.$$
$$\left. + c' \left\{ \frac{e_a}{q_2 d_a} + \int_0^{b_2} \left(1 - \frac{b}{b_2}\right) \frac{db}{q_2 g_a} \right\} + c'' \tau_x \right] \quad . \quad . \quad . \quad (148)$$

Für $K''_s$, die sekundäre Streuung findet sich ein ganz gleicher Ausdruck, worin die Indizes 1 und 2, sowie $a$ und $f$ vertauscht sind. $J_1$ ist der primäre Strom, $Z_1$ die primäre Leiterzahl pro Phase; es sind $q_1$ Nuten pro Pol und Phase; $\tau_x$ ist die Polteilung. Der Index 1 bezw. $f$ bezieht sich auf den Ständer, der Index 2 bezw. $a$ auf den Anker. $c'' \tau_x$ bestimmt die Stirnstreuung, während der übrige Teil der Nutstreuung entspricht.

Aus dem Ausdruck (148) geht unzweideutig hervor, dass es günstig ist, die Schlitzhöhe $e$ sehr gering und die Schlitzweite $d$ weit zu halten, letzteres allerdings nur auf Kosten einer Verringerung der Zahnkrone $s_a$ und $s_f$, was die Streuung wieder vergrössert. Ferner ist ersichtlich, dass die Streuung mit zunehmender Unterteilung der Wickelung, also mit grossem $q_1$ und $q_2$ abnimmt, ebenso sind breite und wenig tiefe Nuten (kreisförmige) von Vorteil und schliesslich empfehlen sich breite Zahnkronen, was gleichbedeutend ist mit grossen Durchmessern, grosser Umfangsgeschwindigkeit und schmalen Motoren. Die bekannte Thatsache, dass die Streuung mit zunehmender Luftinduktion unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen abnimmt, erklärt sich ebenso wie die meist aufgestellte Forderung einer höchstzulässigen Ampèredrahtzahl pro Centimeter Umfang aus der damit verknüpften günstigeren Disposition der Nuten; zu weit kann aber mit dieser Steigerung der Induktion nicht gegangen werden, da sonst die Nuten zur Verminderung der Zahnhysteresis sehr schmal zu halten wären, was die Streuung wieder vermehrt und überdies spielen bei höheren Induktionen die magnetischen Eisenwiderstände, die ja in meinen Endformeln vernachlässigt sind, eine markante Rolle

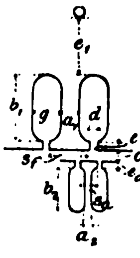


Fig. 161.

1) Es ist bei $c' = 1$ vorausgesetzt, dass die Streufelder ganz unabhängig vom Hauptfelde existieren. Unter dieser Voraussetzung sind die Leitfähigkeiten z. B. des Primärfeldes durch die Rotornuten zu gross angenommen. Wie gross der Fehler ist, lässt sich schwer sagen, da Haupt- und Streufelder annähernd um 90° verschoben sind, so dass der Maximalwert des einen mit dem Nullwert des anderen zusammenfällt. Im Allgemeinen kann man setzen $c' = 0$. Obige Formel vernachlässigt auch alle Eisenwege.

und vergrössern die Streuung. Bei zu hoher Luftinduktion tritt auch $(\cos\varphi)_{max}$ erst bei Überlastung auf.

Der früher öfters erwähnte Streukoeffizient $\sigma = \tau_1 + \tau_2$ (angenähert)

$$= \frac{\text{magnetischer Widerstand des Hauptfeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des primären Streufeldes}}$$

$$+ \frac{\text{magnetischer Widerstand des Hauptfeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des sekundären Streufeldes}}$$

bestimmt sich aus den erwähnten Ausdrücken von $K'_s$ und $K''_s$ nach der Beziehung

$$\sigma = \tau_1 + \tau_2 = \frac{K'_s}{K_r}\frac{J_\mu}{J_1} + \frac{K''_s}{K_r}\frac{J_\mu}{J_2} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (149)$$

$K_r$ ist das resultierende Hauptfeld. Genauer ist $\sigma = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2$, das Verhältnis vom wattlosen Leerstrom zum Diagramm-Durchmesser (Fig. 140).

Für den praktischen Gebrauch hat der Verfasser obige Formeln in folgender Weise zunächst für Dreiphasenmotoren abgefasst (Fig. 162):

$$\left.\begin{aligned} K'_s = c' \cdot \frac{J_1 Z_1}{p}\Bigg[\frac{l}{q_1}\Bigg\{&\int \frac{F_{h_1}}{F_1}\frac{dh_1}{b_1} + \frac{e_1}{s_1} + \frac{\delta}{s_1 + 1{,}6\,\delta} \\ &+ \frac{c'''}{\dfrac{2\,\delta}{\tau_{\delta_1}} + \dfrac{q_1}{q_2}\dfrac{1}{\dfrac{e_2}{s_2} + \int\dfrac{F_{h_2}}{F_2}\dfrac{dh_2}{b_2}}}\Bigg\} + c''\,\tau_x\Bigg] \end{aligned}\right\} \quad \cdot \quad \cdot \quad (150)$$

und

$$\left.\begin{aligned} K''_s = c' \cdot \frac{J_2 Z_2}{p}\Bigg[\frac{l}{q_2}\Bigg\{&\int \frac{F_{h_2}}{F_2}\frac{dh_2}{b_2} + \frac{e_2}{s_2} + \frac{\delta}{s_2 + 1{,}6\,\delta} \\ &+ \frac{c'''}{\dfrac{2\,\delta}{\tau_{\delta_2}} + \dfrac{q_2}{q_1}\dfrac{1}{\dfrac{e_2}{s_2} + \int\dfrac{F_{h_2}}{F_2}\dfrac{dh_2}{b_1}}}\Bigg\} + c''\,\tau_y\Bigg] \end{aligned}\right\} \quad \cdot \quad \cdot \quad (151)$$

Die Masse gehen aus Fig. 162 hervor.[1]) $J_1$ ist der primäre, $J_2$ der sekundäre Strom (effektiv), $Z_1$ ($Z_2$) die primäre (sekundäre) Leiterzahl pro Phase, $l$ die Länge des aktiven Eisens, $q_1$ ($q_2$) die Nutenzahl pro Pol und Phase primär (sekundär), $\tau_{z_1}$ ($\tau_{z_2}$) die Zahnteilung im Luftspalt primär (sekundär) und $F_1$ ($F_2$) die primäre (sekundäre) Nutenfläche. $c'$ ist nach zahlreichen Versuchen

$$2\,\frac{4\pi}{10}\sqrt{2}\;1{,}5 = 5{,}4 \text{ (oder kleiner)},$$

1) Die Brüche mit $c'''$ als Nenner in den Klammern entsprechen der Leitfähigkeit durch die Nuten des Läufers (in 150) bezw. durch diejenigen des Ständers (in 151). Für $c''' = 1$ wäre angenommen, dass das Streufeld von dem Hauptfeld gar nicht beeinflusst wird, d. h. dass es unabhängig von letzterem auftritt. Das ist am ehesten bei Leerlauf der Fall, da beide Felder senkrecht zueinander stehen; bei Belastung heben sich jedoch, trotzdem Haupt- und Streufelder senkrecht zueinander stehen, die Feld- und Anker-Streu-AW für den Luftspalt nach Grösse und Richtung fast völlig auf, so dass die Feld-AW kaum nennenswert Streulinien durch die Rotornuten schicken und umgekehrt, aber dieser Summand mit $c'''$ giebt jedenfalls eine Erklärung dafür, dass der Streukoeffizient vom Leerlauf bis zum Abfallswert abnimmt, um dann wieder zuzunehmen.

falls $c'''$, das nur durch umfangreiche Versuche zu ermitteln ist, einfach gleich Null gesetzt wird; grösser als 0,1 dürfte bei Belastung $c'''$ kaum sein. $c'''$ hängt von der Belastung ab. $\tau_x$ und $\tau_y$ sind die Polteilung in Stator und Rotor. $c''$ ist von der Wicklungsart und der Ausführung der Endverbindungen sowie vom Wickelschritt abhängig; $c''$ ist um so kleiner je näher die Stirnverbindungen am aktiven Eisen liegen; ist der Wickelschritt kleiner als die Polteilung, so wird $c''$ kleiner. Im Mittel kann man wohl für die üblichen Wicklungen setzen

$$c'' = 0{,}1.$$

Das

$$\int \frac{F_h}{F} \frac{dh}{b}$$

ist für runde Nuten 0,66, für Nuten Fig. 162, worin

$$\frac{h}{b} = 2,$$

ist das Integral $\sim$ 1,10. In Formel (151) kann man statt $J_2 Z_2$ auch schreiben $J_2' Z_1$, d. h. man kann die sekundären AW auf den primären Kreis reduzieren. Bei kurzgeschlossenem Motor (Einfluss der Widerstände eliminiert) gilt nach (150) und (151)

$$\left.\begin{aligned} K'_s &= c' \frac{J_k Z_1}{p} \left[\frac{l}{q_1}\left\{-\right\} + c'' \tau_x\right] = c' \frac{J_k \cdot Z_1}{p} \cdot C_1 \\ K''_s &= c' \frac{(J_k - J'_\mu) Z_1}{p} \left[\frac{l}{q_2}\left\{-\right\} + c'' \tau_y\right] = c' \frac{(J_k - J'_\mu) Z_1}{p} C_2 \end{aligned}\right\} \cdot \quad (152)$$

wobei $J_k$ der ideelle primäre Kurzschlussstrom, $J'_\mu$ der primäre Magnetisierungsstrom bei Kurzschluss ist. Dabei setzt man zweckmässig $c' = 5{,}4$ und bei $K'_s$

$$\left[\frac{l}{q_1}\left\{-\right\} + c'' \tau_x\right] = \left[\frac{l}{q_1}\left\{\int \frac{F_{k_1}}{F} \frac{dh_1}{b_1} + \frac{e_1}{s_1} + \frac{\delta}{s_1 + 1{,}6\,\delta}\right\} + 0{,}1\,\tau_x\right] = C_1,$$

bei $K''_s$ entsprechend für den Rotor.

§ 98. Bestimmung von $J_\mu$ und $J_k$.

Man rechnet sich nun zur Ermittelung von $J_\mu$ aus den Induktionen des Hauptfeldes in der Luft und im Eisen (siehe das Diagramm Fig. 143) die pro Drehfeldpol erforderlichen $AW$ aus:

$$AW = 0{,}8\ l_l B_l + \frac{l_1}{\mu_1} B_1 + \frac{l_{z_1}}{\mu_{z_1}} B_{z_1} + \frac{l_{z_2}}{\mu_{z_2}} B_{z_2} + \frac{l_2}{\mu_2} B_2 \cdot \quad (153)$$

$l$ sind die magnetischen Weglängen pro halbem Kreis, $\mu$ die Permeabilitäten[1]), $B$ die mittleren Induktionen mit Rücksicht auf die Streuung, der Index $l$ bezieht sich auf die Luft, 1 auf den primären Teil, $z$ auf die Zähne, 2 auf den sekundären Teil.

1) Die Permeabilität für rasche Magnetisierung ist kleiner als bei langsamer, z. B. bei 50 Perioden um ca. 10% kleiner als für 25. In Fig. 162a ist in Abhängigkeit des Feldes $K$ die AW-Zahl und der magnetische Widerstand pro Kreis (Luft + Eisen) für einen Drehstrommotor aufgezeichnet.

Dann ist

$$J_\mu = c_1 \frac{AW \cdot p}{Z_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (154)$$

und $c_1$ nach Versuchen 1,0—1,7, im Mittel 1,2.

Legt man an einen Drehstrommotor, der festgebremst ist, pro Phase die normale Klemmenspannung $E_{k_1}$, so ist

$$E_{k_1} = c \cdot n_1 \, Z_1 \, (K_s' + K_s'') \cdot 10^{-8} \quad \ldots \quad (155)$$

worin $c = \sim 2{,}1$.

Aus 152 und 155 findet sich

$$E_{k_1} = c \cdot n_1 \, Z_1 \left[ J_k \, C_1 + (J_k - J_\mu') \, C_2 \right] c' \frac{Z_1}{p} \quad \ldots \quad (156)$$

worin $J_\mu'$ annähernd Null ist.

In dieser Beziehung ist alles ausser $J_k$ bekannt, so dass sich aus ihr der Kurzschlussstrom $J_k$ leicht ermitteln lässt. Damit sind aus den Dimensionen

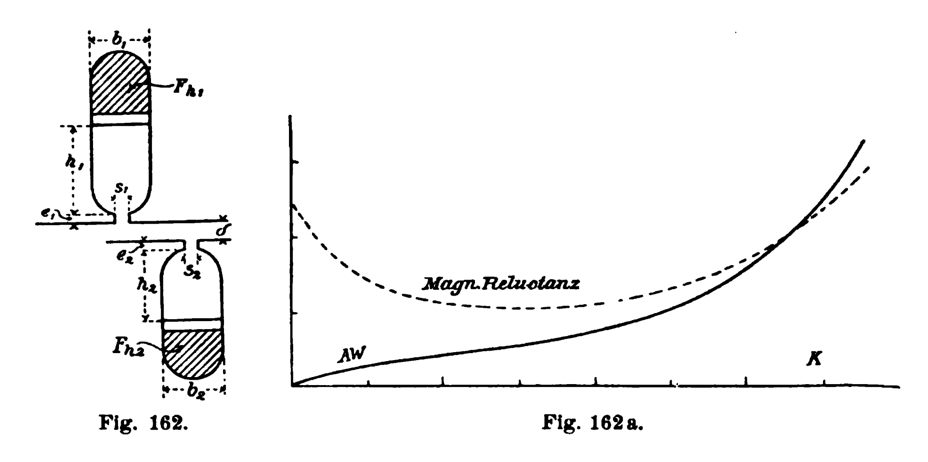



Fig. 162. Fig. 162a.

des Motors Kurzschluss- und Magnetisierungsstrom, die Grundlagen des Drehstrommotoren-Diagramms berechnet.

Es ist angenähert

$$J_k = C \frac{E_{k_1} p}{n_1 Z_1^2 \lambda}$$

wenn $\lambda$ die Gesamtleitfähigkeit der Streufelder bedeutet.

Vernachlässigt man bei der Berechnung der $AW$ (Gleichung 153) die $AW$ für das Eisen, so ist

$$J_\mu = c_1 \frac{B_l \, 0{,}8 \cdot \delta \cdot p}{Z_1}$$

($B_l$ = Luftinduktion, $\delta$ Luftspalt) oder da

$$E_{k_1} = 2{,}1 \, n_1 \, Z_1 f \, B_l \cdot 10^{-8},$$

$$J_\mu = k \frac{E_{k_1} \cdot \delta \cdot p}{n_1 Z_1 f \cdot Z_1}$$

($f$ Luftquerschnitt pro Pol) oder

$$J_\mu = k' \cdot \frac{E_{k_1} \cdot \delta \cdot p^2}{n_1 Z_1^2 d \cdot l}$$

($d$ Duchmesser am Luftspalt, $l$ Motorlänge).

Für $(\cos \varphi_1)_{max}$ ist massgebend

$$\frac{J_k}{J_\mu} = C' \cdot \frac{\dfrac{E_{k_1} p}{n_1 Z_1^2 \lambda}}{\dfrac{E_{k_1} \delta p^2}{n_1 Z_1^2 d \cdot l}}$$

$$\frac{J_k}{J_\mu} = \frac{d \cdot l}{p \cdot \delta \cdot \lambda}$$

$$\lambda = \frac{l}{f(d)} c_x$$

also

$$\frac{J_k}{J_u} = \frac{d f(d)}{p \delta} c_x.$$

Da $f(d)$ beinahe $d^2$ proportional gesetzt werden kann, so ist der $(\cos \varphi_1)_{max}$ um so grösser, je grösser der Durchmesser, und zwar ist eine Vergrösserung des Durchmessers von erheblichem Einfluss, ferner wächst der $(\cos \varphi_1)_{max}$ mit abnehmender Polzahl und abnehmendem Luftspalt $\delta$. Bei grossen Motoren muss der dabei erforderliche grosse Luftspalt durch besonders günstige Nutenform und -zahl wieder aufgewogen werden.

§ 94. Die Streukoeffizienten $\nu, \sigma, \tau$.

Legt man an den primären Teil eines Drehstrommotors die normale Spannung $E'_1$ und misst dann die offene sekundäre Spannung $E'_2$, wiederholt man den Versuch in umgekehrter Reihenfolge, so dass sekundär die Spannung $E''_2$ angelegt und $E''_1$ gemessen wird, so lässt sich aus diesen Messungen der Streufaktor $\sigma$ angenähert bestimmen. Diese Rechenmethode ist jedoch in der Regel sehr ungenau. Es sei

$$\nu'_1 = \frac{E'_2}{E'_1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{c_1 \cdot \lambda'_2}{c_2 \cdot \lambda'_1} \quad \ldots \ldots \quad (155\text{a})$$

$$\nu'_2 = \frac{E''_1}{E''_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \frac{c_2}{c_1} \cdot \frac{\lambda'_1}{\lambda'_2} \quad \ldots \ldots \quad (156\text{a})$$

$c_1$ und $c_2$ sind die Formfaktoren der primären und sekundären Wicklung nach Beziehung (61); $\lambda'_1$ und $\lambda'_2$ ist das Verhältnis $\frac{B_{max}}{B_{mitt}}$, siehe Seite 95. Dann ist angenähert der totale Streufaktor[1])

$$\sigma = \frac{1 - \nu'_1 \nu'_2}{\nu'_1 \nu'_2} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad \ldots \quad (157)$$

---

1) Dabei ist

$$\sigma = \frac{J_u}{J_k - J_u}.$$

Setzt man wie früher

$$\sigma' = \frac{J_u}{J_k},$$

so ist

$$\sigma' = 1 - \nu'_1 \nu'_2 = \tau_1 + \tau_2 - \tau_1 \tau_2.$$

Die früheren Koeffizienten $\tau_1$ und $\tau_2$ sind:

$$\left.\begin{aligned}\tau_1 &= \left(\frac{E'_1}{E'_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{c_2 \cdot \lambda'_1}{c_1 \cdot \lambda'_2}\right) - 1\\ \tau_2 &= \left(\frac{E''_2}{E''_1}\ \frac{Z_1}{Z_2}\ \frac{c_1 \cdot \lambda'_2}{c_2 \cdot \lambda'_1}\right) - 1\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (158)$$

Die Werte $\nu'_1$ und $\nu'_2$ haben die Grösse 0,90—0,99, $\tau_1$ und $\tau_2$ sind 0,01 bis 0,10; $\sigma$ das Doppelte.

Durch besondere Erregung des rotierenden Teiles von Drehstrommotoren ist es möglich die Streuung vollständig zu kompensieren, d. h. den Wert $\cos \varphi_1 = 1$ zu erreichen, siehe die verschiedenen Mittel hierzu Band IV unter „Induktionsgenerator".

§ 95. Streukoeffizient nach Behrend und Heubach.

BEHREND giebt für den Streukoeffizienten

$$\sigma = c \cdot \frac{\text{Luftspalt in mm}}{\text{Polteilung in mm}},$$

wobei für nahegeschlossene Nuten $c = 10-15$.

Wenn die Eisenwiderstände nicht zu vernachlässigen sind, so ist der Wert $\sigma = \frac{J_\mu}{J_k - J_\mu}$ nicht mehr $= \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$.

$\sigma$ wird dann nach J. HEUBACH E. T. Z. 1900, S. 815 folgendermassen entwickelt: Es sei $W$ der Luftwiderstand für das Hauptfeld, $\frac{W}{\xi_1}$ derjenige für das Streufeld der Statorzähne, $\frac{W}{\xi_2}$ der für das Streufeld der Rotorzähne, $\frac{W}{\varrho_1}$ = Widerstand im Statoreisen, $\frac{W}{\varrho_2}$ = Widerstand im Rotoreisen. Dann wird

$$\sigma = \frac{\xi_1(1+\xi_2+\varrho_2)+\xi_2}{\varrho_2} + \frac{\xi_2(1+\xi_1+\varrho_1)+\xi_1}{\varrho_1}$$
$$+ \frac{\xi_1(1+\xi_2+\varrho_2)+\xi_2}{\varrho_2} \cdot \frac{\xi_2(1+\xi_1+\varrho_1)+\xi_1}{\varrho_1}.$$

## l) Besondere Ankerwicklungen.

### a) Kurzschlussanker.

§ 96. Einteilung der Kurzschlussanker.

Die Ankerwicklung kleiner Motoren wird in der Regel in sich kurzgeschlossen: Kurzschlussanker, Käfiganker. Die Kurzschlusswicklung lässt sich verschieden ausführen:

1) als eine mehrphasige, an den Enden geschlossene Serienwicklung (Schleifen- oder Wellenwicklung),
2) als eine Reihe getrennter, für sich geschlossener Stromkreise (Fig. 163).[1])

1) Nach JACKSON, Alternating Currents. Der Anker ist hier nach aussen verlegt, d. h. es rotiert hier der primäre (induzierende) Teil. Dies bedeutet eine Ersparnis an aktivem Material, da der sekundäre Eisenrücken niedrig gehalten werden kann. Ist Toureuregulierung verlangt oder soll dasselbe Modell auch als Einphasenmotor laufen, so wird dieser Gewinn illusorisch.

3) Alle Ankerleiter sind beiderseits direkt miteinander verbunden (eigentlicher Käfiganker).

§ 97. Theorie des Kurzschlussankers.

Rössler hat E. T. Z. 1898, Heft 45 und 46 den Käfiganker bezüglich Stromverteilung und Effektaufnahme untersucht. Er kommt zu dem Resultat, dass der Käfiganker sich wie ein Phasenanker verhält, dessen Wicklung pro Stab den Widerstand

$$w\left(1+\frac{w_\varrho^2}{a^2\, w^2}\right)$$

hat. Dabei ist $w$ der Stabwiderstand des Käfigankers,

$$a = 2 \sin \frac{p\delta}{2},$$

$2p$ die Polzahl,

$$\delta = \frac{2\pi}{Z},$$

$Z$ die totale Ankerleiterzahl und $w_\varrho$ der Widerstand beider Segmente des Kurzschlussringes von Stabmitte zu Stabmitte.

$$\frac{100\, w_\varrho}{a^2\, w}$$

ist die prozentuelle Widerstandszunahme[1]) eines Stabes, die durch die Ringsegmente bedingt ist. Der Effektverlust in den Stäben verhält sich zu dem in den Ringsegmenten wie

$$\frac{1}{w_\varrho\, a^2}.$$

Der mittlere Ringstrom ist $\frac{J_s}{a}$. Bei grosser Stabzahl hat $w_\varrho$ einen bedeutenden Einfluss auf die Widerstandszunahme pro Stab und es kann thatsächlich

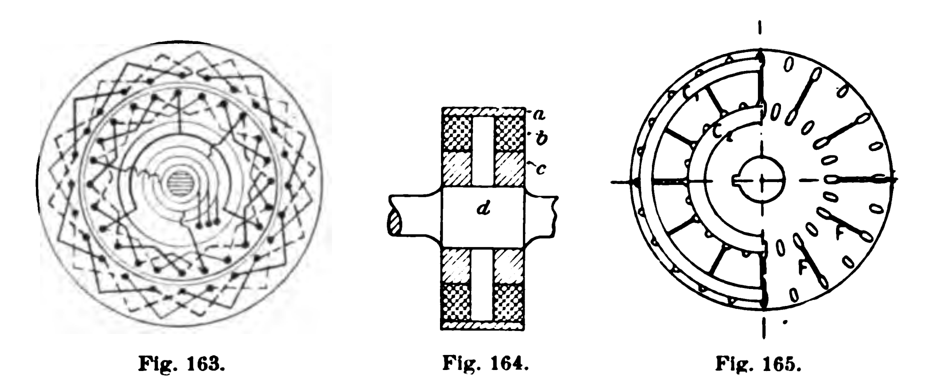



Fig. 163. Fig. 164. Fig. 165.

vorteilhaft werden, die Ankerstäbe gegen die Achse umzubiegen, um möglichst kleinen Ringdurchmesser zu bekommen oder um überhaupt die Stäbe direkt verlöten zu können. Je nachdem

$$\frac{1}{\alpha}\;\frac{1}{p}\;\frac{1}{a} \gtrless 0$$

ist, wird der totale Widerstand durch ein Vergrössern der radialen Abbiegung der Stäbe kleiner oder grösser. Dabei ist

1) Siehe M. Osnos, E. T. Z. 1901, Heft 8.

$$a = \frac{\text{Ringquerschnitt}}{\text{Stabquerschnitt}},$$

$2p$ Pole.

Bei gleichem Totalwiderstand ist der Kupferaufwand für die Stirnverbindungen bei einem Phasenanker gewöhnlich zwei bis dreimal grösser als bei einem Kurzschlussanker.

Angenähert ist der effektive Strom im Ring

$$J_r = J_s \frac{Z}{4p} 0{,}7.$$

($J_s$ ist der Strom im Stab.)

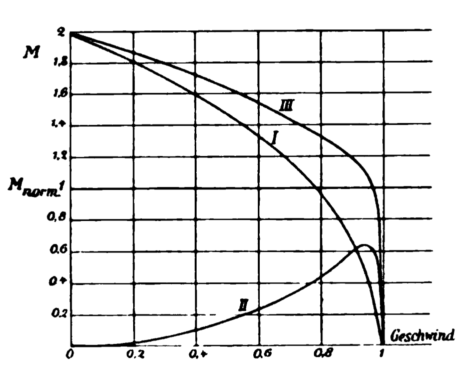
Der Anlaufstrom bei Kurzschlussankern ist in der Regel sehr gross, ohne dass dabei das Anzugsmoment bedeutend wäre, da man den Ankerwiderstand so klein als angängig hält, um den Wirkungsgrad nicht zu verschlechtern. Der Kurzschlussanker wird deshalb höchstens bis 10 PS verwendet, wenn er unter voller Netzspannung anlaufen soll.[1])

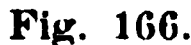
### $\beta$) Stufenanker und Gegenschaltung.

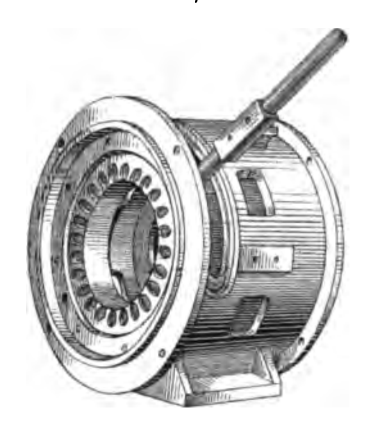
§ 98. Stufenanker der A. E.-G. und von Boucherot.

Bei Motoren zwischen 2 und 20 PS wird die Einfachheit des Kurzschlussankers durch verschiedene besondere Schaltungen angestrebt. Die A. E.-G. baute sogenannte Stufenanker, die zwei Wicklungen tragen, eine mit hohem Widerstand zum Anlassen und eine zweite, die erst nach dem Anlauf durch einen Kurzschlusshebel in Wirksamkeit gesetzt wird.

Boucherot baut eine ähnliche Konstruktion wie die ebengenannte nach Fig. 165: Die äussere Wicklung $C_1$ hat grossen Widerstand, die innere $C_2$





Fig. 166.


Fig. 167.

kleinen. In Fig. 166 sind die Momentenkurven I und II der beiden Wicklungen zu der resultierenden Momentenlinie III zusammengesetzt. Die Schlitze zwischen den äusseren und inneren Nuten (Fig. 165) sollen die Streuung vermindern. Der $\cos\varphi$ dieses Motors ist jedenfalls etwas geringer als derjenige eines gleichwertigen mit einer Wicklung.

---

1) Lahmeyer & Co. hat auf einen eigenartigen Kurzschlussanker das D. R. P. 61 667 vom Jahre 1891 (Fig. 164): *a* ist ein dünner, *c* ein starker Eisenring, beide sind durch Bolzen *d* aus Eisen verbunden, dazwischen liegt ein fugenloser Kupferring *b*.

§ 99. Doppelmotor von Bradley & Boucherot.

BRADLEY liess sich einen Doppelmotor patentieren, der so eingerichtet ist, dass einer der beiden Ständer während des Anlassens von dem Anker abgeschoben werden kann. Die zweite Ankerwicklung wird dann beim Anlassen nicht induziert, ihr Widerstand ist jedoch wirksam. BOUCHEROT führt eine ähnliche Anordnung aus. Der Ständer besteht (Fig. 167) aus zwei Teilen, wovon der eine durch einen Hebel oder ein Handrad drehbar ist. Der Anker Fig. 168 setzt sich aus zwei hintereinander geschalteten Kurzschlusswicklungen zusammen. Beim Anlauf stehen zunächst die beiden Ständerwicklungen so,

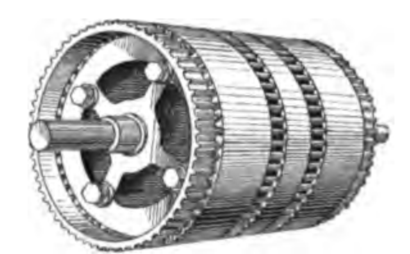


Fig. 168.

dass sie die beiden Anker entgegengesetzt induzieren. Nach und nach wird die eine Ständerwicklung in die gleiche relative Lage gebracht wie die zweite und der Motor läuft zum Schluss wie ein gewöhnlicher Drehstrommotor. Das Anzugsmoment wird dadurch erzielt, dass zwischen beiden Ankerwicklungen ein Kurzschlussring von hohem Widerstand angebracht ist, auf welchen beide Anker beim Anlauf arbeiten, solange ihre elektromotorischen Kräfte

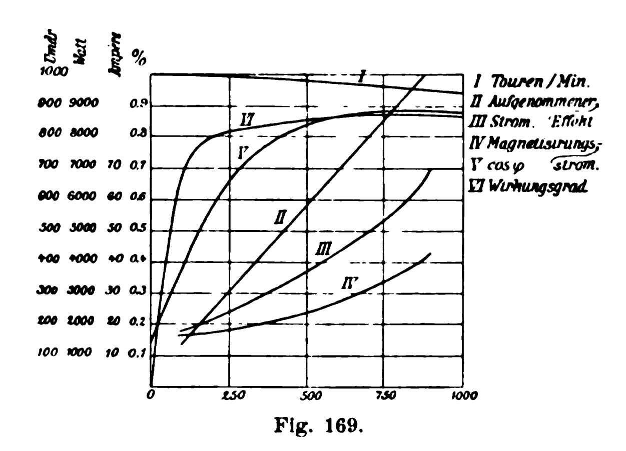


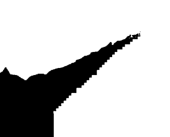

Fig. 169.

sich entgegenwirken. In Fig. 169 sind für einen solchen Motor die Betriebskurven gezeichnet.

HOBART spricht von Drehstrommotoren mit zwei Wicklungen auf dem beweglichen Teil; die eine ist immer kurz geschlossen, die andere hat eine Reihe, um bestimmte Winkel versetzte Anschlusspunkte. Bei Anlauf werden diejenigen Punkte letztgenannter Wicklung kurzgeschlossen, die am weitesten von den Verbindungspunkten der ersten Wicklung entfernt liegen; nachher nähert man sich denselben.

§ 100. Gegenschaltung von

SIEMENS & HALSKE versieht Motoren von 1 bis 20 PS (bei Leerlauf bis 100 PS) mit einer sogenannten Gegenschaltung: Fig. 170 und 171. Es sind



zwei getrennte Ankerwicklungen vorgesehen, deren elektromotorische Kräfte einander zum grössten Teil entgegenwirken (Fig. 170), so dass der Anlaufstrom vermindert wird. Ist der Motor auf etwa $^3/_4$ der vollen Tourenzahl, gekommen, so werden alle Wickelsysteme kurz verbunden (Fig. 171).

**Siemens & Halske; Schaltungen nach Niethammer und Déri.**

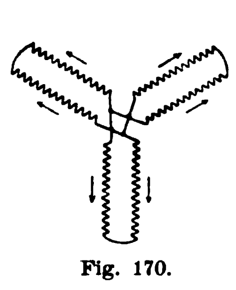


Fig. 170.

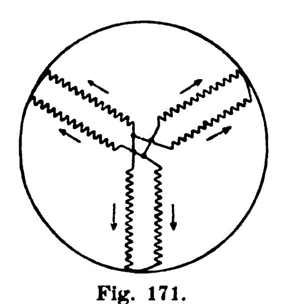


Fig. 171.

Hat der Anker Zweiphasenschaltung, so kann man unter Benutzung der phasenverschobenen Hauptphasen eine gewisse Gegenschaltung nach Fig. 172

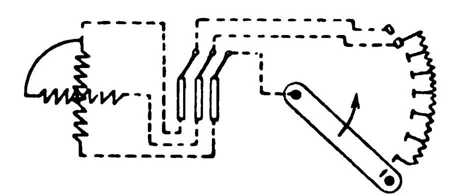


Fig. 172.

erzielen.[1]) In dieser Figur ist allerdings noch ein Anlasswiderstand eingezeichnet, der aber kleiner sein kann als bei der sonst üblichen Schaltung.

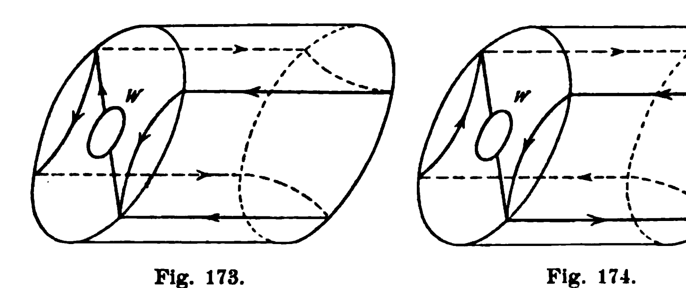



Fig. 173. Fig. 174.

Ist der Schalthebel auf der vorletzten Stufe, so sind die beiden Ankerwicklungen hintereinander verbunden. Hat jede die elektromotorische Kraft $E$, so entsteht bei dem Phasenwiderstand $W$ ein Strom

$$J = \frac{\sqrt{2}\,E}{2\,W} = 0{,}7\,\frac{E}{W}.$$

Auf dem letzten Kontakt fliesst jedoch ein Strom

$$J = \frac{E}{W}.$$

1) E. T. Z. 1899. Ein einfacher Drehstromanlasser von F. Niethammer.

Um günstigen Anlauf mit annehmbarem Wirkungsgrad zu verknüpfen, kann es für kleine Motoren angezeigt werden, mit $4p$-Polen anzufahren und nachher die Ständerwicklung auf $2p$-Pole umzuschalten oder umgekehrt. Deri[1]) hat in dieser Hinsicht eine beachtenswerte Schaltung vorgesehen: Beim Anlauf ist der Motor zweipolig, die im Anker induzierten Ströme (Fig. 173) schliessen sich auf den mitrotierenden Widerstand $W$, so dass ein hohes Anzugsmoment auftritt. Für Normallauf wird auf vier Pole umgeschaltet, wobei die Ankerwicklung (Fig. 174) für die induzierten Ströme unter Umgehung des Widerstandes $W$ in sich geschlossen ist.

### γ) Impedanzanlasser.

§ 101. Impedanzanlasser.

Es wird neuerdings hin und wieder Impedanz zum Anlassen benutzt (Union E.-G., Allmäna Svenska E.-A., Fischer-Hinnen). Man schliesst Fig. 175

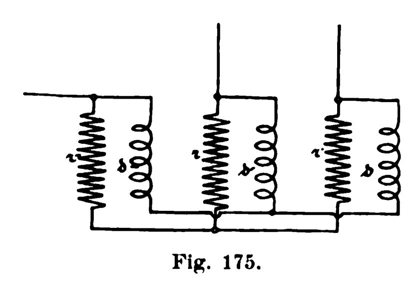


Fig. 175.

und 175a (D. R. P. 105 986 der Union) und Fig. 176 (D. R. P. 110 597) den Rotor z. B. auf eine Drosselspule $s$ von der Selbstinduktion $L$ (Widerstand ver-

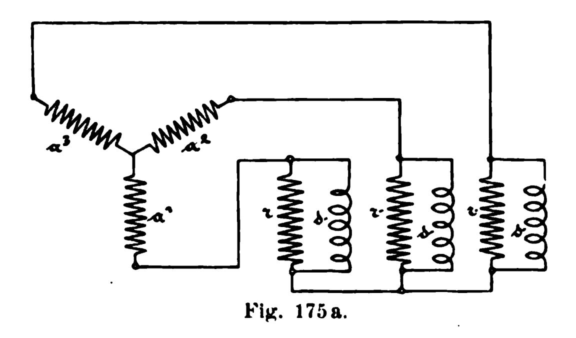


Fig. 175a.

nachlässigbar), zu der parallel ein induktionsfreier ($r$) Widerstand $W$ gelegt wird, am zweckmässigsten so, dass beim Anlauf

$$W = 2\pi n_1 L.$$

$W$ kann so eingerichtet werden, dass bei Stillstand durch ihn ein Strom $J'_2$ fliesst, der dem verlangten Drehmoment entspricht

$$J'_2 = \frac{E_2}{W}$$

$$E_2 = c \cdot n_1 Z_2 K'_2 \cdot 10^{-8}.$$

1) E. T. Z. 1898.

Ausserdem erzeugt der Anker noch

$$J''_2 = \frac{E_2}{2\pi n_1 L}.$$

Beide setzen sich zum totalen Ankerstrom $J_2$ unter dem Winkel $90^0$ zusammen. Kommt der Motor allmählich auf Touren, so verringert sich die Reaktanz $2\pi n_s L$ immer mehr, bei voller Tourenzahl ist die Schlüpfung $n_s$ nur noch wenige Prozente von $n_1$. Die Reaktanzspule, die nur sehr geringen

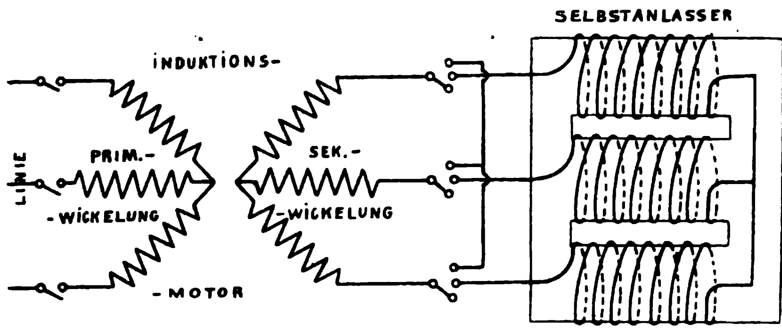



Fig. 176.

Ohmschen Widerstand besitzt, schliesst dann den Anker fast vollständig kurz und der parallele Widerstand $W$ wird so gut wie wirkungslos. Das Anlassen erfolgt somit vollständig automatisch, ohne dass irgendwelche Schaltkontakte, die zu Funkenbildung Veranlassung geben könnten, notwendig

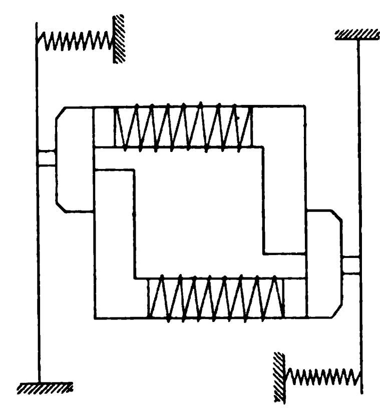


Fig. 177.

werden. Diese Anlassmethode scheint demzufolge die einwandfreieste für Schlagwettergruben. Der Union E.-G. ist ein Verfahren patentiert, das gestattet, bei einer bestimmten Umlaufszahl die Reaktanz durch Vergrösserung des magnetischen Widerstandes zu reduzieren. Es wird nämlich irgend ein Stück des eisengeschlossenen magnetischen Kreises der Reaktanzspulen durch Centrifugalkraft abgeschleudert: Fig. 177 und 178. Dies ist deshalb vorgesehen, weil sonst die dauernd eingeschaltete Reaktanz $2\pi n_s L$ den Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ des Motors noch in nennenswerter Weise herabdrückt. Man kann auch bei einer bestimmten Umlaufszahl die Reaktanzspule und den

Anker gleichzeitig kurzschliessen lassen, die Stromstösse können dann in den zwei kurzgeschlossenen Stromkreisen verlaufen, was allerdings auf Kosten der



Fig. 178.

Feuersicherheit geschieht: Fig. 176. Einen grossen Teil des Ohmschen Widerstandes kann man in die Reaktanzspule selbst legen: Der Eisenkern

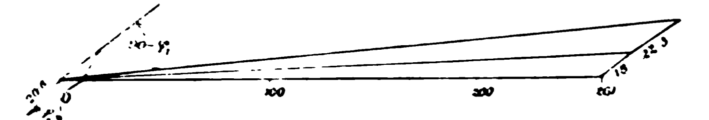


Fig. 179.

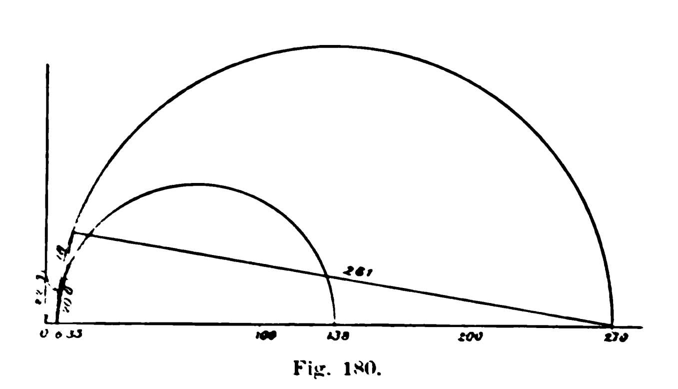


Fig. 180.

rselben wird entweder massiv oder aus sehr starken Blechen hergestellt, dass in denselben starke Wirbelströme und Hysteresis auftreten.

Ein Nachteil der Impedanzanlasser ist der, dass der cos $\varphi_1$ besonders beim Anfahren schlecht ist, d. h. der Motor hat einen grossen wattlosen Anlaufstrom, aber zum automatischen Anlassen aus der Ferne bei geringem Anlaufsmoment besonders in Fällen, wo Funkenbildung auszuschliessen ist, verdient er gewisse Beachtung.

Das Kreisdiagramm für den Drehstrommotor (Fig. 140) ändert sich bei Einschaltung von Impedanz in den Rotor, der Halbkreis wird zu einem

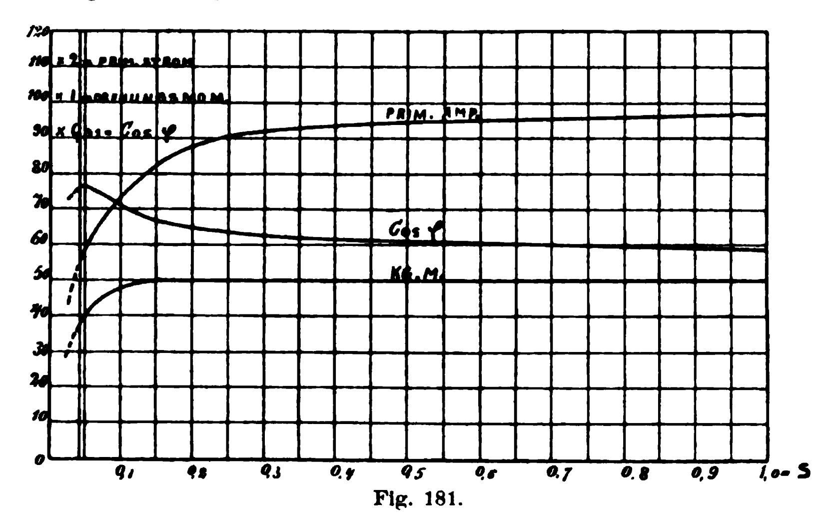



Fig. 181.

Kreisbogen, der über $J_k$ — $J_\mu$ als Sehne beschrieben wird und der einen Winkel $90 + \varphi_2$ fasst ($\varphi_2$ sekundärer Phasenwinkel). Ein Teil des Diagramms ist in Fig. 179 und 180 skizziert.[1]) Es ist daraus namentlich die Vergrösserung des primären Phasenwinkels $\varphi_1$ zu ersehen.

Die Kurven (Fig. 181) zeigen das Arbeiten eines Motors mit Impedanzanlasser nach Fig. 177. Es ist cos $\varphi_1$, primäre Stromstärke und Drehmoment in Abhängigkeit der Schlüpfung dargestellt.

Ist Impedanz und Widerstand in den Motor eingebaut, so ist ein häufiges Anlassen wegen der starken Wärmeentwickelung nicht angängig.

### δ) Kaskadenschaltung.

§ 102. Theorie der Kaskadenschaltung nach Steinmetz.

Setzt man zwei Drehstrommotoren auf gemeinsame Achse und schliesst man die beiden Anker direkt aufeinander, während die eine Ständerwicklung (Motor I) am Netze liegt und die andere (Motor II) in sich oder auf Widerstand geschlossen ist, so erhält man die sogenannte Tandem- oder Kaskadenschaltung. Haben beide Motoren gleiche Polzahl, so stellt sich das Aggregat auf etwa die Hälfte der Tourenzahl ein, die einem Motor an sich entspräche. STEINMETZ bestimmt E. T. Z. 1899, S. 884 auf Grund eines besonderen Symbolismus das Drehmoment des Motors I zu

$$M_I = \frac{E_k^2}{h_1^2 + h_2^2}(f_1 b_1 + f_2 b_2) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (159)$$

1) Aus Fig. 180, welche dem Motor ohne sekundäre Impedanz entspricht, sind die Streufelder u. s. w. für Fig. 179 entnommen.

des Motors II zu

$$M_{II} = \frac{E_t^2}{k_1^2 - k_2^2} a_1 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (160)$$

Dabei ist $E_t$ die primäre Klemmenspannung:

$$k_1 = f_1 + r_0 g_1 - x_0 g_2; \qquad k_2 = f_2 + r_0 g_2 - x_0 g_1;$$

$$g_1 = b_1 + g f_1 - b f_2; \qquad g_2 = b_2 + g f_2 + b f_1;$$

$$f_1 = \frac{d_1}{s}; \quad f_2 = \frac{d_2}{s};$$

$$d_1 = c_1 + r_1 b_1 + s x_1 b_2; \qquad d_2 = c_2 + r_1 b_2 - s x_1 b_1;$$

$$c_1 = s + r_0 b_1 + s x_0 b_2; \qquad c_2 = r_0 b_2 - s x_0 b_1;$$

$$b_1 = a_1 + g; \qquad b_2 = a_2 + b;$$

$$a_1 = \frac{(2s-1) r_1}{r_1^2 + (2s-1)^2 x_1^2}; \qquad a_2 = \frac{(2s-1)^2 x_1}{r_1^2 + (2s-1)^2 x_1^2};$$

$n$ ist die Netzperiodenzahl, die Periodenzahl in den Anker $sn$. Jeder der beiden Motoren hat eine Ständerimpedanz (also primär $\mathfrak{z}_0 = r_0 - j x_0$), eine sekundäre Impedanz $\mathfrak{z}_1 = r_1 - j x_1$ und eine primäre Admittanz $Y = g + jb$.

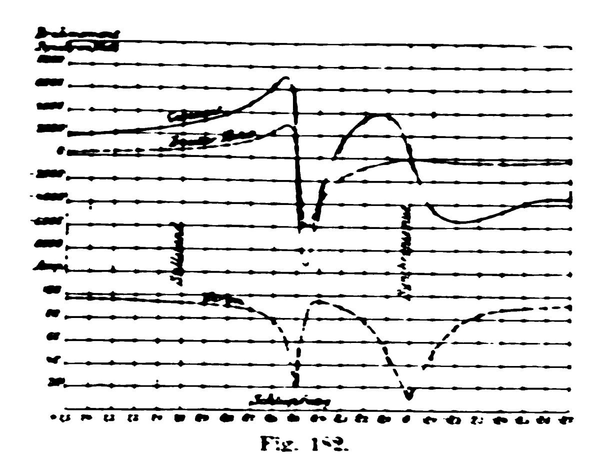



Fig. 182.

Fig. 182 zeigt den Verlauf des Drehmomentes $M_{II}$ und darüber von $M_I + M_{II}$ in Synchronwatt und denjenigen des Stromes als Funktion der Tourenzahl. Bei $2p$-Polen entspricht die angegebene Schlüpfung $s = 0$ der synchronen Tourenzahl

$$u = \frac{60\,n}{p}, \quad \text{bei } s = 0.5 \text{ ist } u = \frac{30\,n}{p} \text{ u. s. w.}$$

Das Drehmoment in Synchronwatt ist:

$$M \cdot 2\pi n \cdot 9.81,$$

$M$ das thatsächliche Moment ist. Zwischen halbem und etwa zwei Synchronismus und ferner oberhalb Synchronismus ist das Gesamt-

moment negativ; der Motor läuft als Generator. Schaltet man viel Widerstand in den zweiten Sekundärkreis, so wird der rechte positive Höcker stark abgeflacht und das Moment bleibt zwischen halbem und fast ganzem Synchronismus negativ.

Die mechanische Leistung $A_{m_1}$ des Motors I ist

$$A_{m_1} = (1 - s) \frac{E_k^2}{h_1^2 + h_2^2} (f_1 b_1 + f_2 b_2) \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (161)$$

des Motors II

$$A_{m_2} = (1 - s) \frac{E_k^2}{h_1^2 + h_2^2} a_1 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (162)$$

Der gesamte zugeführte Effekt $A$ ist

$$A = \frac{E_k^2}{h_1^2 + h_2^2} (h_1 + j h_2) (g_1 + j g)_2 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (163)$$

Der Leistungsfaktor des gesamten Aggregates

$$\cos \varphi = \frac{h_1 g_1 + h_2 g_2}{\sqrt{(h_1^2 + h_2^2)(g_1^2 + g_2^2)}} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (164)$$

Der gesamte Wirkungsgrad wird

$$\eta = \frac{(1 - s)(f_1 + b_1 + f_2 b_2 + a_1)}{h_1 g_1 + h_2 g_2} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (165)$$

Der Wirkungsgrad $\eta$ und $\cos \varphi$ ist bei Tandemschaltung wesentlich ungünstiger als bei Parallelbetrieb von Motoren, wie folgendes experimentell bestätigte Beispiel zeigt: Ein Motorpaar, das bei Parallelbetrieb maximal zeigte

$$\eta = 0{,}85 \qquad \cos \varphi = 0{,}85,$$

ergab bei Tandemschaltung maximal nur

$$\eta = 0{,}60 \qquad \cos \varphi = 0{,}75.$$

Bei geringer Tourenzahl (Tandemschaltung) ist das maximale Drehmoment wesentlich kleiner als bei voller Tourenzahl, was für den praktischen Gebrauch sehr ungünstig wirkt. Die maximale Leistung ist in der Tandemschaltung nur etwa ein Viertel derjenigen in Parallelschaltung.

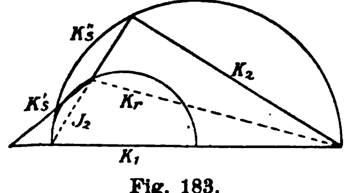


Fig. 183.

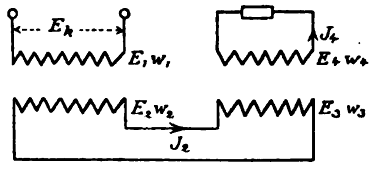


Fig. 183 a.

§ 103. Graphische Theorie.

Graphisch lässt sich die Tandemschaltung mit Hilfe des Diagramms (Fig. 184 und 185) studieren, das aus dem Diagramm (Fig. 183) entwickelt ist. Für die beiden gleichen Motoren ist das normale Kreisdiagramm Fig. 183 vollständig bekannt. Dann verfährt man für irgend eine Schlüpfung $n_s = n_1 - n_2$

($n_2$ Tourenzahl des Aggregats) folgendermassen: Alle Spannungen und Ströme sind auf gleiche Windungszahlen reduziert. Es ist für Motor II (Fig. 184 und 183a)

$$E_2 = E_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \sim E_k \frac{n_s}{n_1}.$$

Für Motor II ist die Schlüpfung $= n_s - n_2 = n_1 - 2n_2$. Mit dieser Schlüpfung geht man in das für Motor II und die Spannung $E_2$ giltige Diagramm (Fig. 184)

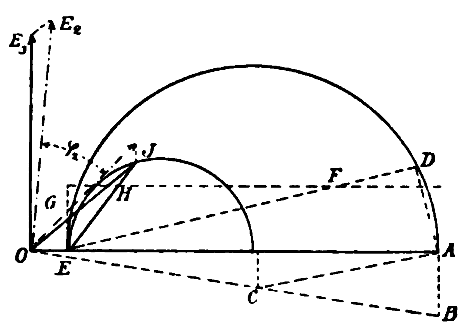



Fig. 184.

ein, welches mit einem Schlüpfungsmassstab [1]) versehen ist. Mache prozentuell $GH = n_1 - 2n_2$, wenn $GF = n_1 - n_2$. Ziehe $EHJ$ und $OJ$, so ist

$$OJ = J_2$$

der in beiden Rotoren fliessende Strom und $\varphi_2$ sein Phasenwinkel. Nun sei in Fig. 185 $OA = K_2$ das Ankerfeld [2]) von Motor I; unter einem ∡ $(90 + \varphi_2)$

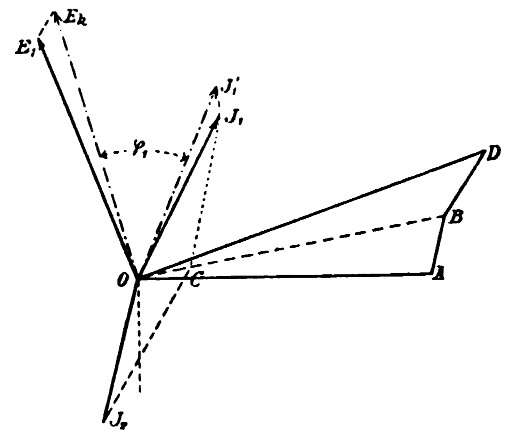



Fig. 185.

liegt der Strom $J_2$, parallel $J_2$ läuft das sekundäre Streufeld $K''_s = AB$, seine Grösse entnimmt man aus Fig. 183 unter Berücksichtigung der

1) Diesen Schlüpfungsmassstab verschafft man sich folgendermassen: In Fig. 184 ist $OA = E_2$, $AB = J_k w_1$, wobei $J_k$ der Kurzschlussstrom ist, der zu $E_2$ gehört, $OC = CB$, $AD \perp AC$, $ED$ schneidet eine beliebige Horizontale in $F$, dann ist $GF = 100\,\%$ Schlüpfung. $GE \perp OE$

2) Auf den absoluten Massstab kommt es nicht an.

gefundenen Grösse $J_2$. Auf $OB$ trage $OC = J_\mu$, den Magnetisierungsstrom des Motors I ab (ebenfalls aus Fig. 183 zu entnehmen). Aus $OC$ und $OJ_2$ ergiebt sich der primäre Strom $OJ_1 = J_1$. Parallel $OJ_1$ ist $BD = K'_s$, die primäre Streuung, deren Grösse aus Fig. 183 entnommen wird. $OD$ ist das primäre Feld. Senkrecht dazu steht die primäre EMK $E_1$. Durch Berücksichtigung des Ohmschen Abfalls findet sich die Klemmenspannung $E_k$, deren Grösse gegeben ist und die rückwärts gestattet, den Massstab von $OD$ genau festzulegen. Schlägt man zu $J_1$ noch den primären Hysteresisstrom, so erhält man den primären Phasenwinkel $\varphi_1$. Dieses Verfahren erheischt ein oftmaliges geschicktes Probieren. Die Kreise der Fig. 184 haben für jeden anderen Wert von $n_2$ bezw. $E_2$ andere Durchmesser bezw. ist ihr Massstab anders aufzufassen.

### ε) Einachsige Schaltung.

§ 104. Einachsige Schaltung.

Die Momentenkurve eines Drehstrommotors mit einachsiger bezw. einspuliger Ankerwicklung (d. h. einphasiger und nicht mehrphasiger Wicklung) verläuft nach Fig. 186[1]) Kurve $M_r$, die sich aus einer Momentenlinie $M_1$ von der Netzperiodenzahl $n_1$ und einer doppelperiodigen ($2n_1$) Momentenlinie $M_2$ zusammensetzt. Der Motor läuft bei $n''_2$ und $n''''_2$ Touren stabil, bei $n'_2$ und $n'''_2$ ist er in labilem Zustand. Solche Motoren, die Steinmetz synchrone

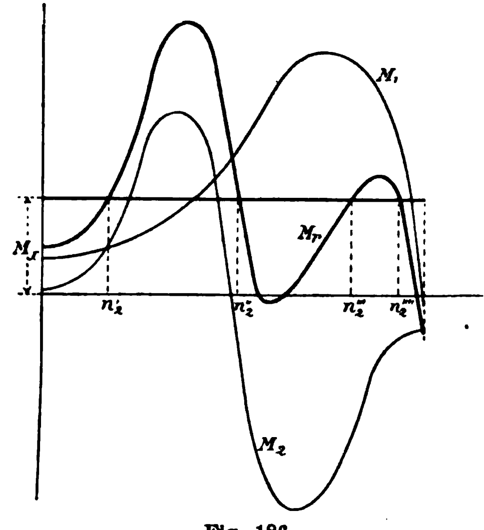



Fig. 186.

Induktionsmotoren nennt, da sie bei Synchronismus ein Moment zeigen, haben bei der niedrigen Tourenzahl $n''_2$ einen schlechten Leistungsfaktor und bei der höheren $n''''_2$ geben sie häufig zu Zuckungen in parallelgeschalteten Glühlampen Veranlassung.

Das Diagramm des einachsigen Motors lässt sich ähnlich entwickeln, wie das Einphasenmotorendiagramm von Eichberg, siehe später, wobei der Motor

1) E. T. Z. 1898, S. 750. F. Niethammer.

in zwei gewöhnliche Drehstrommotoren zerlegt wird, wovon der eine die Schlüpfung $n'_s = n_1 - n_2$, der andere $n''_s = \frac{n_1}{2} - n_2$ hat. Die zwei bestimmenden Drehfelder rotieren im Raum mit $n_1$ und $n_2 - n_s$ als Geschwindigkeit. Für die Ströme $J'$ und $J''$, die Spannungen $E'$ und $E''$ der beiden ideellen Motoren gilt

$$\frac{J'}{J''} = \frac{E''}{E'}$$

und ferner ist die Vektorensumme $E' + E'' = E$ (Netzspannung). Statt den einachsigen Motor mit zwei Ständern mit den Feldern von der Geschwindigkeit $n_1$ und $n_2 - n_s$ aufzufassen, kann man ihn auch als Motor mit einem

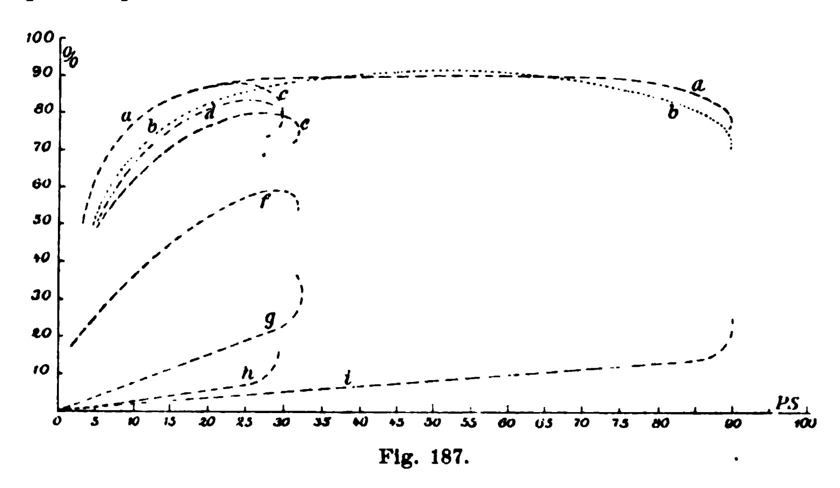



Fig. 187.

Ständer und zwei Läufern oder als eine Kombination eines Drehstrommotors mit einem Einphasenmotor auffassen.

In Fig. 187 ist das Verhalten eines Induktionsmotors in verschiedenen Schaltungen charakterisiert:

*a*) $\eta$-Kurve als gewöhnlicher Dreiphasenmotor

*b*) cos $\varphi$- „ „ „ „

*c*) $\eta$- „ „ einachsiger Motor bei voller Tourenzahl

*d*) cos $\varphi$- „ „ „ „ „ „ „

*e*) $\eta$- „ „ „ „ „ halber Tourenzahl

*f*) cos $\varphi$- „ „ „ „ „ „ „

*g*) Schlüpfungskurve „ „ „ „ „

*h*) „ „ „ bei voller Tourenzahl

*i*) „ als gewöhnlicher Dreiphasenmotor.

Gesamter Leerlauf: Bei gewöhnlicher Schaltung 1900 Watt,

„ einachsiger Wicklung (volle Touren) 1500 Watt,

„ „ „ (halbe „ ) 2700 „

## m) Tourenänderung.

§ 105. Polumschaltung.

Die Möglichkeit einer rationellen Tourenregulierung[1]) ist bei Drehstrommotoren ziemlich beschränkt. Meist wird durch zusätzlichen Ankerwiderstand reguliert, wobei jedoch der Wirkungsgrad sehr stark abnimmt, siehe die früheren Theorien; der $\cos \varphi$ bleibt jedoch sehr hoch, so hoch wie ohne Widerstand. Am wirtschaftlichsten ist vielleicht neben der Kaskadenschaltung und der einachsigen Wicklung die Polumschaltung, da die Tourenzahl $u$ ist:

$$u = \frac{60\,n}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (166)$$

Neben den Anordnungen von ZIEL[2]) und DAHLANDER[3]), die Kurzschlussanker voraussetzen, sind besonders die neueren Patente von HEYLAND auf Polumschaltungen zu erwähnen. Fig. 188 zeigt eine Umschaltung des Stän-

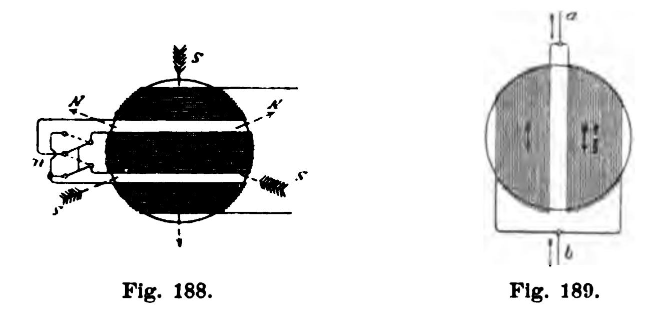


Fig. 188. Fig. 189.

ders von zwei auf sechs Pole, Fig. 189 die Wicklung eines Läufers, der für zwei und vier Pole passt; bei zwei Polen liegt zwischen $a$ und $b$ ein Widerstand (ähnlich der Schaltung von DÉRI).

D. R. P. 109 986 enthält folgende Schaltungsweise für Drehstrommotoren zur Erzielung zweier verschiedener Geschwindigkeiten. Für die erste Geschwindigkeitsstufe werden die Phasenwicklungen des Läufers kurzgeschlossen, während sie für die zweite Geschwindigkeitsstufe mit dem Netz verbunden sind, derart, dass im Läufer ein Drehfeld erzeugt wird, dessen Drehrichtung derjenigen des Ständerfeldes entgegengesetzt ist.

Ein gemeinsamer Nachteil der Polumschaltung, der Kaskadenschaltung und einachsigen Wicklung ist der schlechte $\cos \varphi$ bei reduzierter Umlaufszahl (bei Polumschaltung 1 : 2 fällt z. B. der $\cos \varphi$ von 0,85 auf 0,60, $\eta$ von 0,85 auf 0,80) und ferner der Umstand, dass es stark sprungweise, keine stetigen Reguliermethoden sind. Bei halber Tourenzahl gilt auch für die Polumschaltung, dass das Moment kleiner ist als bei voller.

SCHUCKERT hat sich auf die Anordnung Fig. 190 (Stator) und Fig. 189 (Rotor) das D. R. P. 112 094 erteilen lassen. Die Eigenart der Schaltung liegt darin, dass die Stromrichtung jeder anderen Spule umgeschaltet werden

1) F. NIETHAMMER, Hebe- und Transportmaschinen.
2) E. T. Z. 1898.
3) E. T. Z. 1897.

kann. Für vier Pole werden die Phasen an die sechs Enden (Fig. 188) in folgender Reihe angeschlossen: Phase 1 2 3 1 2 3; für zwei Pole: Phase

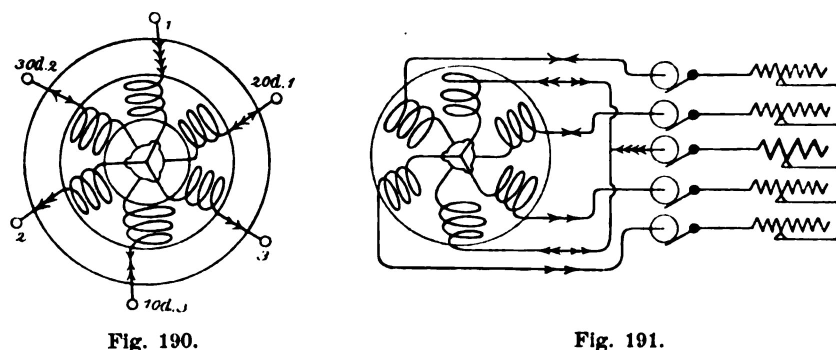


Fig. 190. Fig. 191.

1 1 3 3 2 2. Die Rotorwicklung ist mit derjenigen des Stators übereinstimmend. Es sind nach Skizze (Fig. 191) mindestens fünf Schleifringe erforderlich.

## n) Anlasser und Bremsung.

§ 106. Primäre Anlasser.

Drehstromanlasser im primären Teil verringern die Zugkraft mit dem Quadrat der Klemmenspannung am Motor. Sie sind mit Rücksicht auf die Motorimpedanz

$$\sqrt{W_i^2 + (2\pi n L_i)^2} = \frac{E_k}{J_k} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (167)$$

zu bemessen: $W_i$ Motorwiderstand, $L_i$ Selbstinduktionskoeffizient, $E_k$ Klemmenspannung, $J_k$ Kurzschlussstrom bei $E_k$.

§ 107. Ankeranlasser.

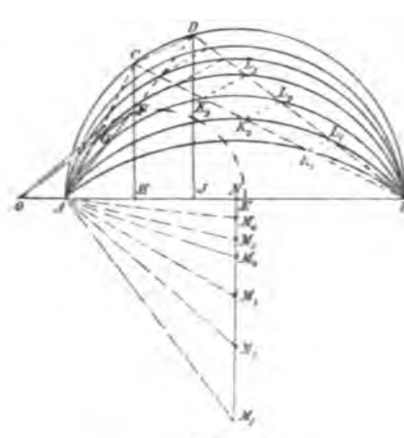


Fig. 192.

Zur Bestimmung der Abstufung von Anlassern im Ankerkreise, die neben einer Stromverminderung eine Zugkrafterhöhung bedeuten, eignet sich am vorteilhaftesten das graphische Verfahren[1]) Fig. 192. $OB$ ist die gesamte Spannung, $OA$ die primäre Streuspannung und zugleich der Magnetisierungsstrom $J_\mu$ (leer), $OE$ der ideelle Kurzschlussstrom primär im Strommassstab. $OG$ entspricht dem kleinsten Strom $J_{min}$ und $OF$ dem grössten $J_{max}$ beim Anlassen. $CH$ ist ein Mass für den zugeführten Effekt $A_{min}$ bei $J_{min}$ und $DJ$ für $A_{max}$ bei $J_{max}$. $DJ$ bezw. $OF$ wird angenommen mit Rücksicht auf den Stromstoss im Netz. $M_1$ giebt den Mittelpunkt eines Kreises durch $B$ und $A$, der $DB$ berührt. $CH$ werde ebenfalls, und zwar möglichst wenig verschieden von $DJ$ gewählt. Die Linie $BC$ schneidet

1) E. T. Z. 1900, p. 37. F. Niethammer.

den Kreis aus $M_1$ in $K_1$. Man zieht dann $K_1$ $L_1$ parallel $CD$, durch $A$, $L_1$ und $B$ wird aus $M_2$ ein zweiter Kreis gelegt u. s. w. Die Strecken $NM_1$, $NM_2$ ... sind je proportional dem Produkt aus dem für einen Motor festliegenden Kurzschlussstrom und dem gesamten jeweiligen Ankerwiderstand. $M_1\,M_2$, $M_2\,M_3$, $M_3\,M_4$ ... oder $B\,L_1$, $L_1\,L_2$, $L_2\,L_3$ ... entsprechen also direkt den Widerständen der einzelnen Stufen des Ankeranlassers. Die sekundäre EMK bei Anlauf findet sich aus dem Ankerfeld $K_a$, das man einem Diagramm nach Fig. 140 entnehmen kann.

§ 108. Anlasser von Siemens & Halske und der Gen. El. Co.

Zur Reduktion der Stufenzahl von Anlassern hat KAHLENBERG (SIEMENS & HALSKE) eine Schaltung angegeben, wobei immer nur eine Stufe einer Phase, nicht je eine in allen drei Phasen gleichzeitig abgeschaltet wird. Die Gen. El. Co. hat sich neuerdings eine ähnliche Anordnung nach Fig. 193

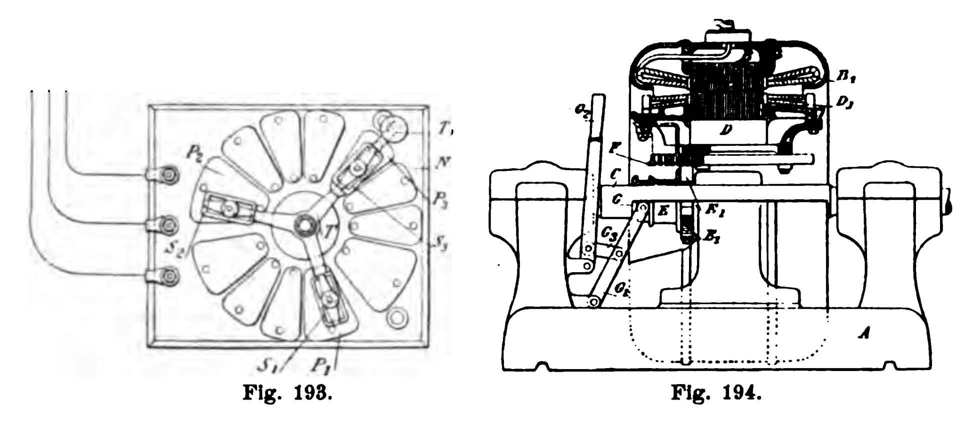


Fig. 193. Fig. 194.

patentieren lassen. Die Kontaktsegmente der drei Phasenwiderstände sind verschieden breit. Der Motor (Fig. 194) hat diesen Anlassapparat rotierend auf der Achse montiert.[1]) $F$ ist ein Eisenrost, dessen Widerstandsstäbe zugleich als Kontakte ausgebildet sind.

§ 109. Bremsung.

Der Drehstrommotor lässt sich wie der Gleichstrommotor als Generator zur Bremsung benutzen. Sobald er übersynchron angetrieben wird, was auch durch plötzliche Erniedrigung der Periodenzahl oder Erhöhung der Polzahl zu machen ist, schickt er als Induktionsgenerator Strom ins Netz. Die Bremsung ist wie beim Nebenschlussmotor eine Nutzbremsung. Durch Umkehr der Drehfeldrichtung (Vertauschung zweier Drähte) tritt eine Gegenstrombremsung in Wirksamkeit, die keine Nutzbremsung ist. Unabhängig vom Netz wie der Gleichstrommotor kann der Induktionsmotor nicht als Bremse wirken.

## o) Theorie nach Fischer-Hinnen.

§ 110. Wicklungsarten.

Aus dem Aufsatz „Berechnung von asynchronen Wechselstrommotoren" in Z. f. E. Wien 1900 von Fischer-Hinnen führe ich folgende besonders beachtenswerte Punkte auf: Es giebt zwei charakteristische Wickelarten für Drehstrommotoren

---

1) Ausführliches über Anlasser und Tourenregulatoren für Drehstrommotoren siehe F. NIETHAMMER, Hebe- und Transportmaschinen.

a) getrennte Phasenwicklungen; bei $p'$ Phasen wird $\frac{1}{p'}$ der Polbreite nur mit Leitern einer Phase bewickelt;

b) ineinandergreifende Phasenwicklungen, die mit den Serien-Trommelwicklungen bei Gleichstrom übereinstimmen und wobei jede Phase $\frac{2}{p'}$ der Polbreite bedeckt, so dass sich die Phasen abwechselnd überdecken.

Die getrennten Wicklungen (a) erfordern bei gleichem Leerstrom und gleichen Eisensättigungen 10 bis 15 % weniger Windungen und mithin bei gleichem Ohmschen Verlust 20 bis 25 % weniger Kupfer.

§ 111. Koeffizienten.

Für das Verhältnis

$$k = \frac{B_{mitt}}{B_{max}}$$

in der Luft unter Voraussetzung eines Reduktionsfaktors $\gamma$ des Luftquerschnitts infolge der Zackenöffnungen und Papiereinlagen (?) von ~ 0,7 bei geöffneten und 0,87 bei geschlossenen Nuten, sowie von

$$k' = \frac{\text{Drehfeld}}{p'\text{mal maximale Totallinienzahl pro Phase und Pol}}$$

giebt Fischer-Hinnen.

Tabelle I.

Werte von $k$ und $k'$.

| Anzahl Nuten pro Pol und Phase | 2 Phasen a $k$ | 2 Phasen a $k'$ | 2 Phasen b $k$ | 2 Phasen b $k'$ | 3 Phasen a $k$ | 3 Phasen a $k'$ | 3 Phasen b $k$ | 3 Phasen b $k'$ | 4 Phasen a $k$ | 4 Phasen a $k'$ | 6 Phasen a $k$ | 6 Phasen a $k'$ | Kurzschluss-Anker $k$ | Kurzschluss-Anker $k'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{Z_{tot}}{2pp'} =$ 1 | 1 | 0·5 | — | — | 1 | 0·415 | — | — | 1 | 0·411 | 1 | 0·420 | 1 | 0·410 |
| 2 | 0·81 | 0·47 | — | — | 0·92 | 0·431 | — | — | 0·96 | 0·420 | 0·97 | 0·420 | 1 | 0·410 |
| 3 | 0·79 | 0·473 | — | — | 0·89 | 0·444 | — | — | 0·94 | 0·430 | 0·96 | 0·425 | 1 | 0·410 |
| 4 | 0·78 | 0·477 | 1 | 0·57 | 0·84 | 0·467 | 0·68 | 0·50 | 0·92 | 0·440 | 0·94 | 0·434 | 1 | 0·410 |
| $\infty$ | 0·75 | 0·490 | 1 | 0·52 | 0·84 | 0·467 | 0·67 | 0·51 | 0·875 | 0·456 | 0·92 | 0·431 | 1 | 0·410 |

a Wicklung mit getrennten Phasen
b „ „ ineinandergreifenden Phasen.

Tabelle II.

Schwankungen der wirklichen Feldstärken über oder unter der ideellen.

| Nutenzahl pro Pol und Phase | 2 Phasen a über | 2 Phasen a unter | 2 Phasen b über | 2 Phasen b unter | 3 Phasen a über | 3 Phasen a unter | 3 Phasen b über | 3 Phasen b unter |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{Z_{tot}}{2pp'} =$ 1 | 11 % | 21 % | % | % | 5 % | 8·5 % | — | — |
| 2 | 8 | 10 | — | — | 6 | 2·5 | — | — |
| 3 | 4 | 5 | — | — | 3 | 2 | — | — |
| 4 | 3 | 3 | — | — | 0·5 | 0·5 | — | — |
| $\infty$ | 2·7 | 2·7 | 3·2 | 3·2 | 0·2 | 0·2 | 0·5 | 0·5 |

Bei sinusförmigem Feld folgt der Koeffizient $c'$ der Formel

$$E = 1{,}11\, c'\, n \frac{Z_{tot}}{a\, p'} K \cdot 10^{-8}$$

folgender Tabelle ($Z_{tot}$ totale Leiterzahl, a parallelgeschaltete Leiter):

Tabelle III.

Werte von $c'$.

| Anzahl Nuten pro Pol und Phase | 1 Phase | 2 Phasen | | 3 Phasen | | 4 Phasen | 5 Phasen | 6 Phasen | Kurzschluss-Anker |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | a | b | a | b | | | | |
| 1 | — | 2 | — | 2 | — | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | — | 1·85 | — | 1·93 | — | 1·96 | 1·976 | 1·983 | 2 |
| 3 | — | 1·82 | — | 1·92 | — | 1·954 | 1·97 | 1·98 | 2 |
| 4 | 1·385 | 1·81 | 2·77 | 1·91 | 1·66 | 1·952 | 1·97 | 1·98 | 2 |
| ∞ | 1·27 | 1·79 | 2·54 | 1·91 | 1·16 | 1·94 | 1·97 | 1·98 | 2 |

a Wicklung mit getrennten Phasen,
b „ „ ineinandergreifenden Phasen.

In Fig. 194a ist für eine vielnutige Dreiphasenwicklung aus den Einzelfeldern das Drehfeld in zwölf verschiedenen Augenblicken gezeichnet.

§ 112. Streukoeffizienten.

Bezüglich des Streuungskoeffizienten sagt F. H.: Nach meiner Erfahrung nimmt die Streuung gewöhnlich nur ab bis etwa zu jenem Punkte, welcher der maximalen Zugkraft entspricht und fällt am grössten beim Anlassen ohne Widerstand aus.[1])

Die Streuung bei Leerlauf misst er nach den Gleichungen 156a und b $\left(\frac{1}{\nu_1} = \nu'_1 \cdots\right)$, die Streuung bei irgend einem Strom $J_1$ oder $J'_1$ dadurch, dass er den Motor kurz schliesst und eine derartige Spannung abwechselnd an Stator und Rotor legt, dass $J_1$ und $J'_1$ auftreten. $J_2$ tritt im kurzgeschlossenen Rotor auf, wenn vom Netz $J_1$ kommt; $J'_1$ tritt im kurzgeschlossenen Stator auf, wenn vom Netz $J'_2$ kommt, dann ist

$$\frac{1}{\nu_2} = \nu'_2 = \frac{J_2}{J_1} \frac{c'_2}{c'_1} \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\frac{1}{\nu_1} = \nu'_1 = \frac{J'_1}{J'_2} \frac{c'_1}{c'_2} \frac{Z_1}{Z_2}$$

falls $c'_1$ und $c'_2$ die Art der Wicklung primär und sekundär berücksichtigen.

Für die Streuung giebt F. H. eine ähnliche Formel wie (150) und (151), nämlich der Streuungskoeffizient $\nu'$ (primär oder sekundär) ist

1) Das stimmt mit Beobachtungen anderer und des Verfassers überein.

$$\frac{1}{\nu} = \nu' = 1 + \frac{2\delta a p}{c_1 \gamma d l}\left[\frac{2p}{x}\,1{,}26\,\Lambda + y d\left(0{,}1 + 0{,}92 \log_{10}\frac{s_1}{s}\right)\right],$$

dabei ist $\delta$ der Luftspalt,

$$a = \frac{\text{totaler magnetischer Widerstand}}{\text{Luftwiderstand}}$$

= 1,05 bis 1,15, $c_1$ ein Koeffizient, der die Wickelart berücksichtigt, $\gamma$ der oben genannte Reduktionsfaktor = 0,7 bis 0,87, $d$ der Ankerdurchmesser am Luftspalt, $l$ die Ankerlänge, $y\,\frac{d}{2p}$ bedeutet die mittlere Länge einer Stirnverbindung, $x$ die totale Nutenzahl, $s$ ist der Durchmesser eines rund gedachten Drahtbündels bestehend aus

$$\frac{Z_{tot}}{2pp'}$$

Leitern und $s_1$ der Durchmesser der äussersten Streulinien, die gerade das Eisenblech noch berühren.

§ 113. Reibungsverluste.

Die Reibungsverluste von asynchronen Motoren sind im allgemeinen grösser als man anzunehmen geneigt ist, was wohl dem geringen Luftabstand und den dadurch möglichen magnetischen Zugkräften zuzuschreiben ist[1]). Für Überschlagsrechnungen kann Tabelle IV benutzt werden:

Tabelle IV.

Angenäherte Werte des durch Reibungsverluste verursachten mechanischen Wirkungsgrades.

| PS | 10 | 25 | 50 | 100 | 150 |
|---|---|---|---|---|---|
| Leerlauf . . . . | 0·94 | 0·95 | 0·96 | 0·97 | 0·97 |
| Normal . . . . . | 0·92 | 0·93 | 0·94 | 0·94 | 0·95 |
| Anlassen . . . . | 0·82 | 9·85 | 0·88 | 0·90 | 0·92 |

§ 114. Anlassen.

Bezüglich des Anlassens bemerkt F. H. zunächst, dass man dasselbe Anzugsmoment mit zwei Ankerwiderständen erreichen kann, das einemal mit kleinem Widerstand und grosser Stromstärke bei schlechtem cos $\varphi_1$, wobei das Moment nach dem Anlassen noch steigt, das anderemal mit grossem Widerstand und kleinem Strom bei gutem cos $\varphi_1$, wobei das Moment nach dem Anlassen dauernd abnimmt. Erstere Methode ist nur bei Anlassern ohne

1) Siehe eine Mitteilung des Herrn HISSINK im elektrotechnischen Verein Berlin, Ende Dezember 1900: Die zusätzlichen Reibungsverluste bei erregtem Feld können bei kleiner Luft über 100 % betragen, sie sind um so grösser je kleiner die Luft ist, sodass man einen gewissen Kompromiss zwischen günstigstem cos $\varphi$ und günstigstem $\eta$ schliessen muss. Die Werte in Tabelle IV scheinen sehr niedrig.

Unterabteilungen, die in den Motor eingebaut sind, und für kleine Motoren üblich. Die Abstufung der Anlasser erfolgt nach Figur 194b, worin $g_1$, $g_2$,

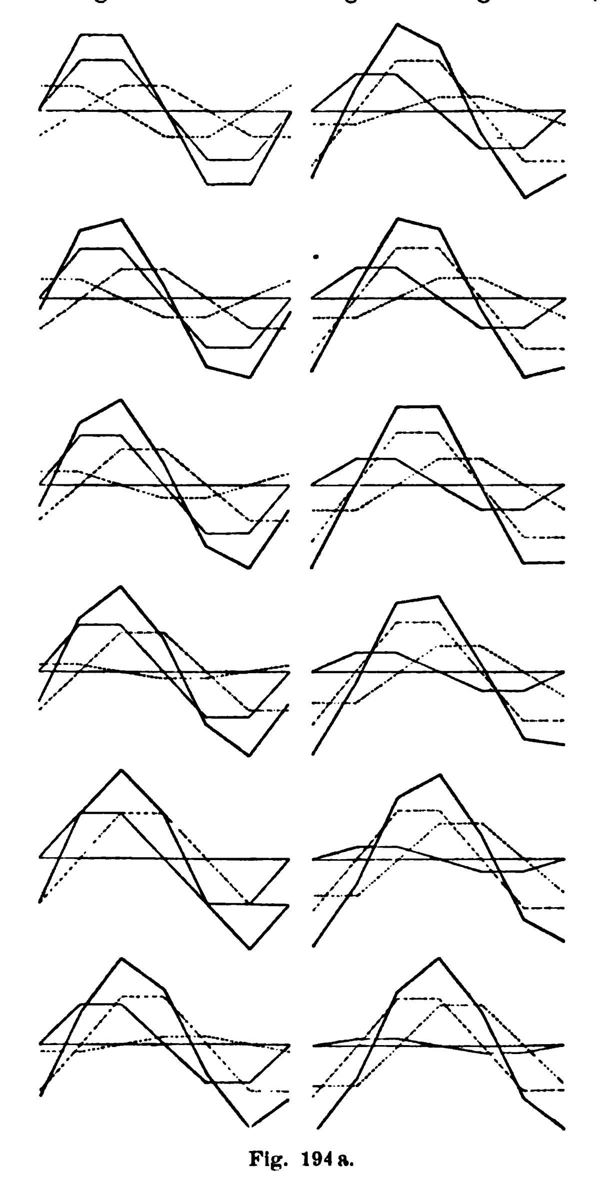


Fig. 194 a.

$g_3 \cdots\cdots$ die Schlüpfungen auf den verschiedenen Kontakten sind. Es sei bei $m$ Widerständen pro Phase

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M} = \frac{\text{maximales Anzugsmoment}}{\text{normales Moment}} = \frac{J_{max}}{J}$$

$$g_{m+1} = g\,\lambda^{m+1}$$

($g$ unvermeidliche Schlüpfung bei kurzgeschlossenem Anlasser).

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{g}}$$

$$m = \frac{\log \frac{1}{g}}{\log \lambda} - 1$$

Der Widerstand $w_x$ irgend einer Stufe ist

$$w_x = w_a (\lambda - 1) \lambda^{x-1}$$

wenn $w_a$ der Ankerwiderstand ist. Der Gesamtwiderstand auf der $x^{ten}$ Stufe ist

$$\Sigma w_x = (\lambda^x - 1) w_a.$$

§ 115. Regulierung.

Um bei einem gegebenen Moment die Tourenzahl $u$ bei kurzgeschlossenem Rotor auf $u'$ zu regulieren, ist vorzuschalten

$$w = w_a \left(\frac{1-g}{g}\right) \left(1 - \frac{u'}{u}\right)$$

($g$ wie oben Schlüpfung entsprechend $u$-Touren).

§ 116. cos $\varphi$, Ampèredrähte, Umlaufsgeschwindigkeit.

Für $(\cos\varphi)_{max}$ giebt F. H. angenähert:

$$(\cos\varphi)_{max} = \frac{1-\sigma'}{1+\sigma'} \cdot \frac{0{,}96}{(1-\varepsilon)(1-\varepsilon')}$$

wenn $\varepsilon$ der prozentuelle primäre Kupferverlust und $\varepsilon'$ der prozentuelle Eisenverlust ist, $\sigma'$ wie früher

$$1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2}.$$

Für den Wert

$$\beta = \frac{Z_{tot}}{a} \frac{J_w}{d^2},$$

worin $Z_{tot}$ die primäre Totalleiterzahl, $a$ die Zahl parallelgeschalteter Leiter bezw. Stromkreise, $J_w$ die Nutzstromstärke und $d$ den Luftspaltdurchmesser

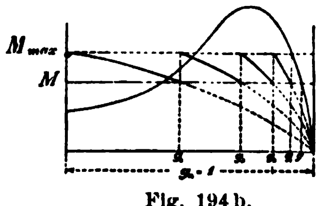



Fig. 194 b.

bedeuten, lässt sich bei Niederspannung setzen 5 — 8 (die grössere Zahl bei kleinen Motoren), bei Hochspannung $\beta < 4$ bis 5.

Für die Umfangsgeschwindigkeit lässt sich folgendes sagen:

| PS | v |
|---|---|
| 1 — 5 | 10 — 15 m |
| 5 — 20 | 15 — 20 m |
| > 20 | 20 — 25 m |

## p) Verschiedene charakteristische Grössen.

§ 117. Induktion.

Die Induktion im Feldeisen schwankt bei 50 Perioden zwischen 3000 und 6500 je nach Grösse des Motors und je nach den Ventilationsverhältnissen. Im Rotorkern kann man bis auf das Doppelte gehen. Bei anderen Periodenzahlen $n_x$ kann man umrechnen:

$$\frac{B_x}{B_{50}} = \sqrt[1,8]{\frac{50}{n_x}}.$$

Die mittlere Zahninduktion sollte 11 bis 12 000 nicht übersteigen, da sonst die AW für die Zähne sehr gross werden. Die Luftinduktion bewegt sich etwa zwischen 2000 und 4000; sie kann um so grösser sein, je kleiner der Luftspalt und je kleiner die Periodenzahl. Sie ist im wesentlichen dadurch bedingt, dass $J_\mu$, der Magnetisierungsstrom, gewöhnlich nicht grösser als $^1/_3$ des normalen Stromes $J_m$ sein soll, nur ausnahmsweise wird man bis $^1/_2$ $J_m$ zulassen. Die Verhältnisse wählt man zweckmässig so, dass $J_m$ gleich 1,1 bis 1,6 mal dem Strom bei $(\cos\varphi)_{max}$ ist.

§ 118. Nutenform.

Die Nutentiefe sollte bei den grössten Motoren keinesfalls grösser als 45 mm sein und bei kleineren nicht mehr als 30 mm betragen; die Nutenzahl pro Pol und Phase schwankt im Stator zwischen 2 und 5, im Rotor findet man häufig mehr. Bei vielen nahezu geschlossenen Nuten ist es nicht notwendig, dass die Nutenzahl im Stator und Rotor verschieden ist.

§ 119. Stromdichte.

Die Stromdichte[1]) fällt von kleinen Motoren ausgehend etwa von 4,5 bis 2,0; bei Stabwicklung wird die Stromdichte gewöhnlich um 10 bis 20 % kleiner gewählt als bei Draht- oder Litzenwicklung und zwar der Wirbelströme und des Skineffektes wegen. Im Rotor besonders bei Kurzschlussankern geht man des Anlaufsmomentes halber mit der Strombelastung höher als im Stator. In der Bürstenfläche kann man bei Kohle immerhin 10 Amp / $c^2$ und bei Kupfer bis 50 Amp / $c^2$ zulassen.

§ 120. Luftspalt.

Der kleinstzulässige Luftspalt hängt vom Ankerdurchmesser $d$, von der Ankerlänge, der Ankerumfangsgeschwindigkeit, von der Stärke und Güte bezw. von der Durchbiegung der Welle und der Güte der Lager ab. KAPP setzt z. B. den Luftspalt in cm

$$\delta = \frac{d^{cm}}{500} \text{ oder } \delta = 0{,}02 + \frac{d^{cm}}{1000}.$$

Man geht meist noch etwas darunter. Eine gute Formel, deren Werte aber bei dem gegenwärtigen Stand der Maschinentechnik kaum unterschritten werden dürfen, ist

$$\delta = \frac{d}{390 + 3{,}1\,d} = \sim \frac{d/3}{100 + d} = \sim \frac{1}{\frac{300}{d} + 3}.$$

Die Koeffizienten 390 und 3,1 sind namentlich bei schwierigen, stossweisen Betrieben wie bei Bahnmotoren wesentlich zu verkleinern, aber die Abhängigkeit $\delta$ von $d$ dürfte die Formel in praktisch brauchbarer Weise ausdrücken.

1) Bei Berechnung der Erwärmung nach Band IV des Handbuchs für Elektrotechnik sollte man auch die freie Oberfläche der Wicklung sowie die freie Oberfläche der Ventilationskanäle entsprechend berücksichtigen.

# V. Einphasiger Induktionsmotor.

## a) Allgemeines.

§ 121. Drehfeld des Einphasenmotors.

Während beim Drehstrommotor direkt im primären Teil ein Drehfeld bezw. zwei senkrecht aufeinanderstehende Wechselfelder erzeugt werden, wird im Einphaseninduktionsmotor mit Mehrphasenanker[1]) nur das eine der beiden Wechselfelder im wesentlichen primär hervorgerufen, das dazu senkrecht stehende wird durch die Ankeramperewindungen bedingt.[2]) Dieses senkrechte Feld ist bei Stillstand einfach Null, da in diesem Zustande die Anker-AW gerade so pulsieren wie die primären. Bei Synchronismus ist das senkrechte Feld ein Maximum, jedoch nie ganz so gross wie das andere, primär erzeugte. Man kann die senkrechte Feldkomponente annähernd der Ankertourenzahl proportional setzen. Da nun das Drehmoment von dem Produkt Ankerstrom mal senkrechter Feldkomponente abhängt, so bekommt man annähernd die Momentenkurve des Einphasenmotors, wenn man diejenige des entsprechenden Drehstrommotors mit

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{Tourenzahl}}{\text{synchrone Touren}}$$

multipliziert.

Die Zugkraft bei Stillstand ($n_2 = 0$) ist Null.

§ 122. Erregerstrom.

Beim Mehrphasenmotor ist bei vollem Synchronismus der Ankerstrom Null, der Anker des Einphasenmotors führt jedoch auch bei Synchronismus den Erregerstrom für die senkrechte Feldkomponente. Dieser Erregerstrom hat bei Synchronismus die doppelte Frequenz der äusseren EMK. Dieser Erregerstrom im Anker ist selbstverständlich durch das Netz aufzubringen, so dass dem Motor ein primärer und ein sekundärer Erregerstrom zuzuführen ist, mit anderen Worten, der Einphasenmotor braucht, da beide Erregerströme ebenso wie die zugehörigen Felder annähernd gleich sind, den doppelten Erregerstrom des Dreiphasenmotors von gleicher Grösse. Der Leerlaufstrom ist beim Einphasenmotor in Prozenten vom normalen Strom grösser als beim Mehrphasenmotor (30—60 $^0/_0$ je nach Grösse). Das Ankereisen des Einphasenmotors wird auch bei Synchronismus cyklisch magnetisiert und zwar mit der Periode $2 n_1$, während der Mehrphasenmotoranker in diesem Falle nicht ummagnetisiert wird.

## b) Betriebskurven.

§ 123. cos $\varphi$ und Wirkungsgrad.

Die Betriebskurven des Einphasenmotors verlaufen ähnlich wie diejenigen beim Mehrphasenmotor; cos $\varphi_1$ und Wirkungsgrad sind in der Regel 5—10 $^0/_0$ kleiner. Der $(\cos \varphi_1)_{max}$ für einen Einphasenmotor ist angenähert

$$(\cos \varphi_1)_{max} = \frac{2 \cos \varphi_3}{c - \cos \varphi_3 (c - 1)},$$

1) Siehe STEINMETZ, E. T. Z. 1899, p. 439.

2) Hat der Anker nur einen Stromkreis, so ist der Motor ein sogenannter synchroner Induktionsmotor, eine Reaktionsmaschine (siehe diese).

wenn $\cos \varphi_3$ der maximale $\cos \varphi$ bei Drehstrom und $c = 3$ bis 4 ist. Der Wirkungsgrad $\eta_1$ des Einphasenmotors ist

$$\eta_1 = c' \eta_3 - 100 \ (c' - 1) \text{ wobei } c' = 1,3-2,1$$

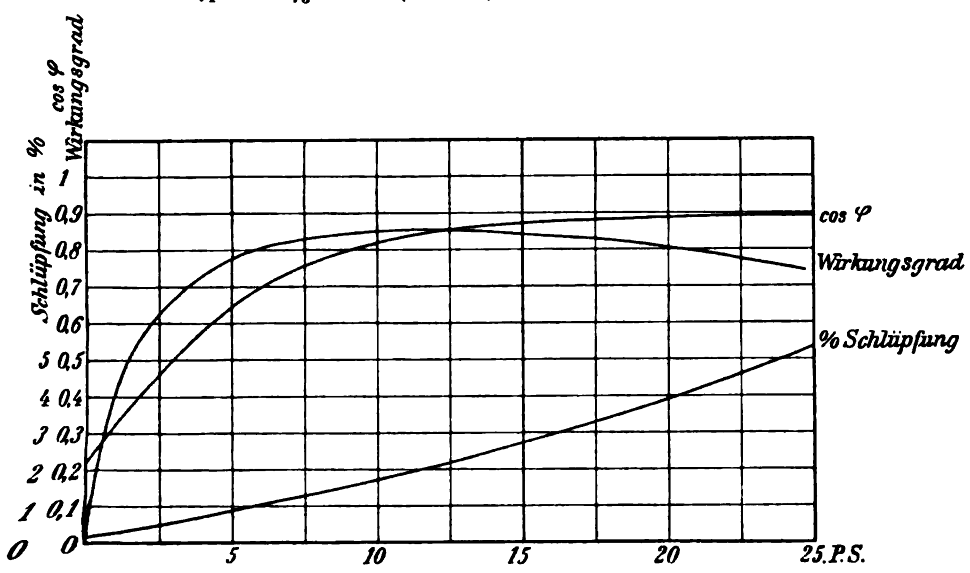



Fig. 195. Einphasenmotor für 15 PS von Siemens & Halske.

je nach der Ankerinduktion, dasselbe Modell vorausgesetzt. Verwendet man für eine und drei Phasen dieselben Modelle, so leistet der einphasige Motor 70—80 % des mehrphasigen. Dabei ist allerdings 20 bis 40 % grössere

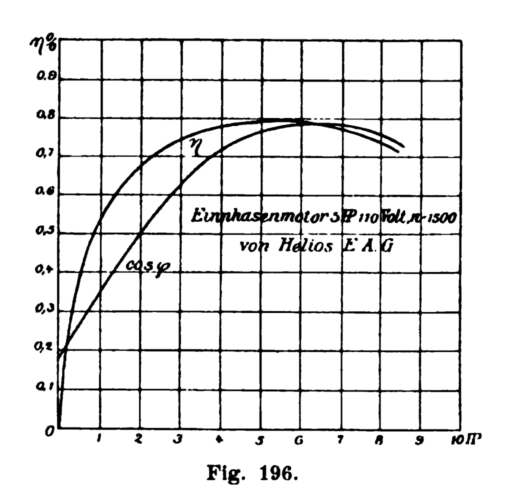



Fig. 196.

Magnetisierung als bei Drehstrom oder ein wesentlich geringerer Überlastungsfaktor $U'$ vorausgesetzt. Bei gleicher Magnetisierung fällt der Einphasenmotor schon bei 40 % der maximalen Drehstromleistung ab.

§ 124. Betriebskurven.

Der $\cos \varphi$, Wirkungsgrad und die Schlüpfung eines 15pferdigen Einphasenmotors von SIEMENS & HALSKE verläuft nach Fig. 195. Ein 5 PS-Motor von Helios-Köln ergab die Resultate Fig. 196. Ein $2^1/_2$—3pferdiger

Motor zeigte die günstigen Verhältnisse Fig. 197. Der Wert des maximalen $\cos \varphi$ ist 0,91. Die Überlastungsfähigkeit ist etwa zweifach. Das Drehmoment[1]) in Abhängigkeit der Tourenzahl Fig. 198 erinnert wohl an den Mehrphasenmotor; ein wesentlicher Unterschied ist indes der, dass bei der

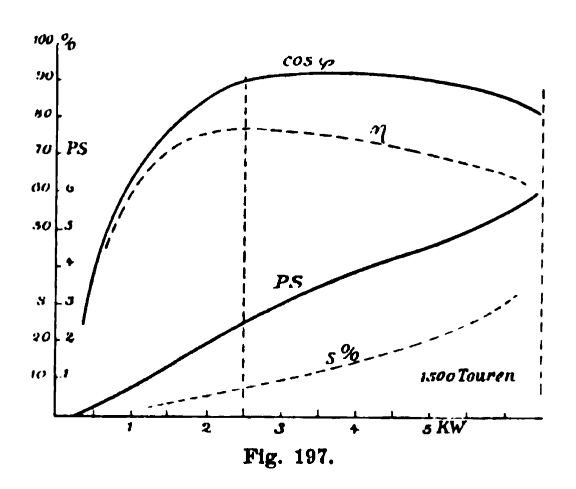



Fig. 197.

Tourenzahl Null (Schlüpfung = 1) das Moment Null ist und ferner, dass mit zunehmendem Ankerwiderstand (0,1; 0,25; 0,6 und 1,6 Ohm) das maximalmögliche Drehmoment erheblich abnimmt. Die Kurven haben wie bei Mehrphasenmotoren rechts einen stabilen, links einen labilen Ast. Die Kurven Fig. 198 laufen von $s = 0$ steiler an als beim Mehrphasenmotor, d. h. die

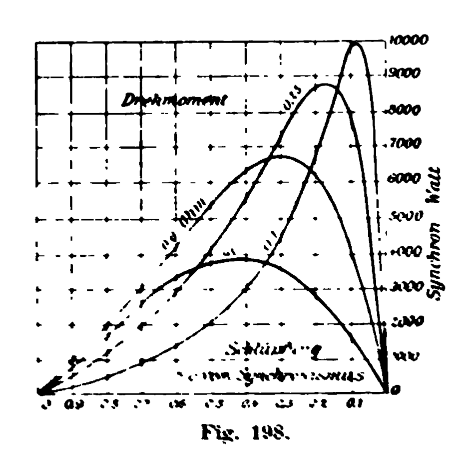



Fig. 198.

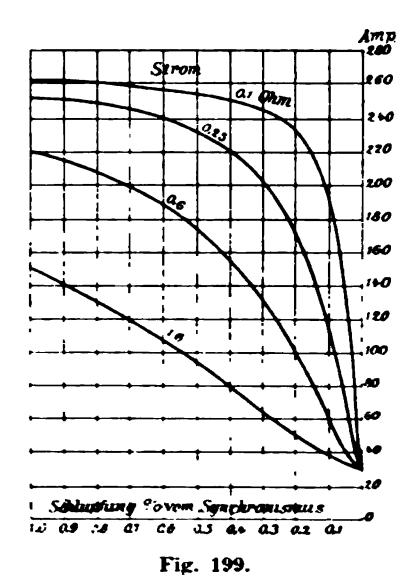



Fig. 199.

Tourenzahl ist bei variabler Belastung konstanter. Eine Tourenregulierung durch Ankerwiderstand ist beim Einphasenmotor nicht angezeigt, da, wie erwähnt, das Moment viel rascher fällt als die Tourenzahl. Der Strom des Einphasenmotors verläuft bei verschiedenen Ankerwiderständen nach Fig. 199.

1 Fig. 198 und 199 nach P. STEINMETZ. E. T. Z. [illegible]. p. 453.

## c) Theorie des Einphasenmotors.

### α) Verschiedenes.

§ 125. Heyland. Behrend.

Heyland und andere Autoren verwenden das Mehrphasenmotorendiagramm ohne wesentliche Abänderung auch für den Einphasenmotor. Behrend entwickelt z. B. E. T. Z. 1897 das Einphasendiagramm folgendermassen: Der Einphasenmotor wird als die Summe zweier Drehstrommotoren aufgefasst, deren Drehfelder in entgegengesetztem Sinne rotieren. In Fig. 200 ist $OB$ der gesamte wattlose Leerstrom des Einphasenmotors, der sich aus den Magneti-

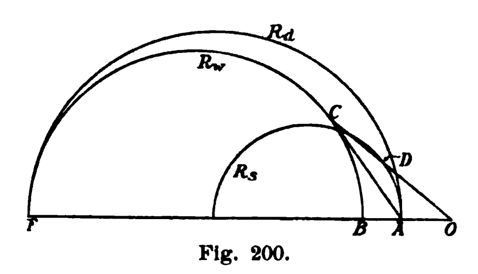



Fig. 200.

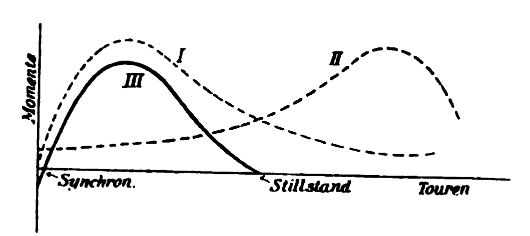



Fig. 201.

sierungsströmen $OA + AB$ der beiden ideellen Drehstrommotoren zusammensetzt, d. h. $OA$ ist der Magnetisierungsstrom des Einphasenmotors bei offenem Anker. Ist $\sigma$ der von den Drehstrommotoren übernommene Wert des gesamten Streukoeffizienten, so ist

$$\frac{OA}{OB} = \frac{1+2\sigma}{2+2\sigma} \geq 0{,}5 \quad \cdots \cdots \quad (168)$$

Der gesamte Primärstrom ist $OC$, wobei $C$ auf dem Halbkreis $R_w$ wandert, wenn $R_d$ der für den entsprechenden Drehstrommotor giltige Kreis ist:

$$OF = AO + \frac{AO}{\sigma}.$$

Der Sekundärstrom wird durch den Vektor $AC$ dargestellt. Der Kreis $R_s$ teilt $OC$ derart, dass

$$\frac{OD}{OC} = \frac{1+2\sigma}{2+2\sigma} \quad \cdots \cdots \quad (169)$$

Auf Grund derselben Anschauungen lässt sich die Drehmomentenkurve des Einphasenmotors als die Summe zweier Momentenkurven von Drehstrom-

motoren auffassen, deren Drehfelder umgekehrt rotieren.[1]) Diese Konstruktion ist in Fig. 201 ausgeführt. I und II sind die Momentenlinien der beiden Drehstrommotoren, III ist das resultierende Moment. Diese Theorie übersieht indes vollständig die Rückwirkung der Ankerampèrewindungen auf die beiden entgegengesetzt rotierenden Drehfelder, so dass die Resultate höchstens in der Nähe des Synchronismus annähernd mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Zwischen Stillstand und Synchronismus lassen sich z. B. auch unter normalen Verhältnissen (angenähert sinusförmige Feldverteilung) keine negativen Drehmomente beobachten, welche aus dieser Theorie folgen würden.

### β) Theorie von Heubach.

§ 126. Heubach.

HEUBACH ist in E. T. Z. 1899, p. 314ff. dem wahren Verhalten des Einphasenmotors ziemlich nahe gekommen. Er setzt das primäre Wechselfeld auch aus zwei entgegengesetzt rotierenden Drehfeldern[2]) zusammen, aber er

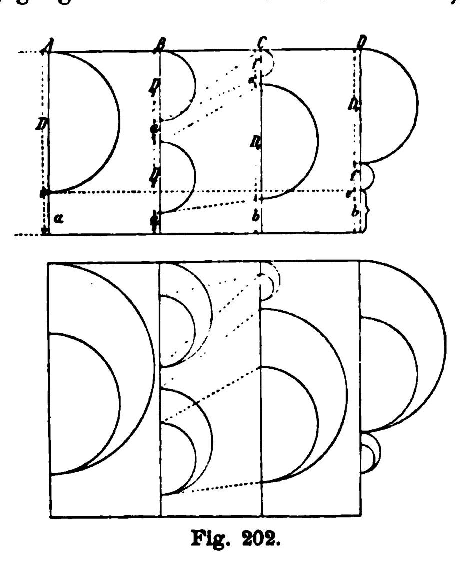


Fig. 202.

macht die beiden Drehfelder entsprechend der Belastung und der damit verknüpften Ankerreaktion verschieden gross. Die Stromkreise des HEYLANDschen Diagramms entwickelt HEUBACH nach Fig. 202 bis 203. Fig. 202 A entspricht dem identischen Drehstrommotor mit dem Streukoeffizienten

$$\sigma = \frac{a}{D}.$$

Fig. 202B gilt für den stillstehenden Einphasenmotor, die beiden Drehfelder sind gleich gross, da die Ankerreaktion beide in genau gleicher Weise beeinflusst,

$$\sigma = \frac{a}{2} : \frac{D}{2}.$$

1) G. FERRARIS, The Electrician Bd. 33; G. KAPP, Elektr. Kraftübertragung.

2) Bezw. fasst den Einphasenmotor als zwei hintereinandergeschaltete Drehstrommotoren auf.

Läuft der Einphasenmotor, so entwickelt sich das Diagramm allmählich und nimmt schliesslich bei völligem Leerlauf das Aussehen von Fig. 202 *C* an. Die unteren Figuren enthalten die Strom- und die Spannungs(Feld)kreise.

Es ist aus den Abbildungen direkt zu entnehmen

$$\frac{e}{f} = \frac{b}{D_e} = \sigma \quad \ldots \ldots \ldots \quad (170)$$

$$\frac{D_e}{D} = \frac{1+\sigma}{1+2\sigma} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (171)$$

$$\frac{b+e+f}{a} = \frac{\text{Magnetisierungsstrom des Einphasenmotors}}{\text{Magnetisierungsstrom des Mehrphasenmotors}} = \frac{2+2\sigma}{1+2\sigma} \quad (172)$$

$$\frac{b+e+f}{D_e} = 2\sigma \quad \ldots \ldots \ldots \quad (173)$$

Bei Stillstand ist der Ständerstrom des Einphasenmotors = dem Ständerstrom des identischen Mehrphasenmotors, ebenso sind bei Stillstand die beiden Ankerströme gleich.

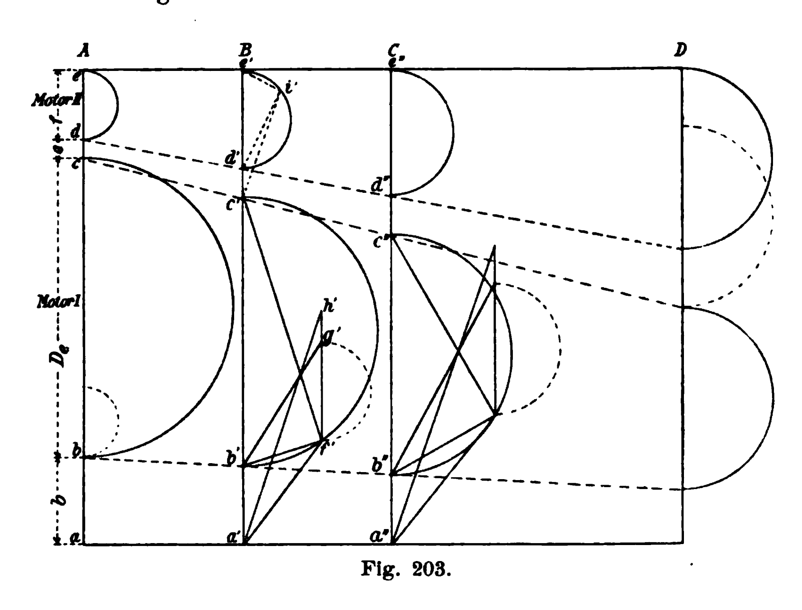



Fig. 203.

Ist $J_w$ der wattlose Leerstrom des Wechselstrommotors, $J_d$ derjenige des Drehstrommotors, $J_k$ der beiden gemeinsame, primärgemessene Kurzschlussstrom, so lässt sich die Beziehung entwickeln:

$$2 J_d (J_k - J_w) = (J_k - J_d) J_w \quad \ldots \ldots \quad (174)$$

Das Verhalten des Einphasenmotors zwischen Stillstand (Fig. 203 D) und Synchronismus (Fig. 203 A) wird durch die zwischenliegenden Diagramme Fig. 203 B und C dargestellt. Die Strecken $ae$, $a'e'$ .... sind konstant. Geht man von Fig. 203 A aus, wo der Einphasenmotor leer läuft, so wächst mit der Belastung der Ständerstrom $ce$ des ideellen Motors II auf $c'e'$. Da die beiden ideellen Drehstrommotoren hintereinandergeschaltet gedacht sind, so muss im Motor I der Ständerstrom $a'f'$ auch gleich $c'e'$ sein. Die Zusammen-

setzung beider Ströme $a'f'$ und $c'e'$ oder der zugehörigen $AW$ giebt $a'h'$. Die beiden Ankerströme sind $d'e'$ uud $b'f'$, ihre Resultante $b'g'$. Das Ankerfeld des Motors I ist $c'f'$, diesem ist die Zugkraft proportional, da Motor II ein Ankerfeld = 0 hat.[1])

§ 127. Grundbeziehungen nach Heubach.

Die Grundbeziehungen für den Einphasenmotor sind die folgenden. Die primäre EMK $E_1$ ist ($K_1$ = Drehfeld)

$$E_1 = c n_1 Z_1 K_1 \cdot 10^{-8} \quad \ldots\ldots \quad (175)$$

HEUBACH giebt für $c$ die Werte:

| Nuten pro Pol (total) | Nuten pro Pol u. Hauptphase | $c$ | $\lambda$ |
|---|---|---|---|
| 2 | 1 | 2,22 | 1,0 |
| 6 | 4 | 1,95 | 1,5 |
| 6 | 3 | 2,22 | 1,3 |
| 12 | 8 | 1,88 | 1,5 |
| 12 | 6 | 2,00 | 1,3 |

$\lambda$ ist der Quotient für die Luftinduktion: $\frac{B_{max}}{B_{mittel}}$.

Falls $B_l$ die Luftinduktion im Mittel darstellt, ist $K_1 = B_l \cdot q_l \, (1 + \tau_1)$ ($q_l$ der Luftquerschnitt pro Pol und $\tau_1$ der primäre Streukoeffizient).

Die Ampèrewindungen $(AW)_{max}$ pro Pol sind ($\delta$ Luftspalt)

$$(AW)_{max} = 0{,}8 \cdot \delta \cdot (B_l \cdot \lambda) = \sqrt{2}\, J_\mu \frac{Z_1}{2p} \quad \ldots \quad (176)$$

also Magnetisierungsstrom $J_\mu$:

$$J_\mu = \frac{2}{\sqrt{2}\, Z^1}\, 0{,}8\, \delta p\, (B_l \lambda)$$

oder

$$J_\mu = 1{,}13\, \delta p\, (B_l)_{max} \quad \ldots\ldots \quad (177)$$

Im Diagramm Fig. 202 bezw. 203 wird nun im Feldmassstab (Spannungsmassstab)

$$D_e + f + e + b = (B_l)_{max}$$

$$e + b = \sigma \cdot (B_l)_{max}$$

$$D_e = B_e \frac{1 + \sigma}{1 + 2\sigma}$$

$$b = \sigma D_e$$

$$e = \frac{\sigma}{1 + \sigma} b.$$

Im Strommassstab bedeutet

$$e + b = J_\mu.$$

1) Weitere Einzelheiten siehe E. T. Z. 1899, p. 316 ff.

Dann ist im selben Massstabe

$$b + e + f = J_L,$$

wenn $J_L$ den gesamten wattlosen Leerstrom im Ständer darstellt.

Der Magnetisierungsstrom $J_L'$ im Läufer (wattloser Leerstrom) ist

$$J_L' = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{2}\,\frac{Z_1}{Z_2} \cdot f \text{ für einen Zweiphasenanker} \\ \\ 1{,}5\,\frac{Z_1}{Z_2} \cdot f \text{ „ „ Dreiphasenanker} \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad (178)$$

Dabei soll $Z_2$ die totale Ankerleiterzahl darstellen.

Der primäre Strom $J_1$ bei irgend einer Belastung ist $a' f'$, der sekundäre $J_2$.: $b' g'$ (Fig. 203). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sobald man die Ohmschen Widerstände berücksichtigt, das Ankerfeld des Motors II nicht mehr Null sein kann; dasselbe muss zur Überwindung eben dieses Widerstandes proportional $e' i'$ (Fig. 203) sein. Unter diesen Umständen (Berücksichtigung der Verluste) ist Fig. 203

$$h' f' = \| c' i'$$

und[1])

$$g' f' = \| d' i'.$$

Die Ankerinduktion $(B_2^I)_{max}$ für den Motor I ist $f' c'$, diejenige $(B_2^{II})_{max}$ für II ist $i' e'$ (Feld-, bezw. Induktionsmassstab). Damit wird die Zugkraft

$$P = 7{,}2\, \lambda' l \cdot Z'_2 \left\{ J_2^I \,(B_2^I)_{max} - J_2^{II}\,(B_2^{II})_{max} \right\} \cdot 10^{-8} \cdot \quad (179)$$

$\lambda'$ ist der auf Seite 96 angegebene Koeffizient für die Ankerwicklung, $l$ die Ankerlänge, $Z_2$ die totale Ankerleiterzahl und $J_2^I = l' f'$, $J_2^{II} = d' i'$ (Fig. 203).[2])

### γ) Theorie nach Eichberg.

§ 128. Eichberg.

Eichberg hat in E. T. Z. 1900, p. 484 wohl das zutreffendste Diagramm für den Einphasenmotor entwickelt. Er betrachtet die Einphasenwicklung

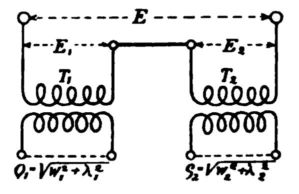



Fig. 204.

als zwei in Serie geschaltete Drehfeldwicklungen (Fig. 204), die sich wie zwei Transformatoren $T_1$ und $T_2$ verhalten. Die elektromotorischen Kräfte derselben verhalten sich wie die Impedanzen

1) Im Strommassstab.
2) Im Strommassstab.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varrho_1}{\varrho_2} = \frac{\sqrt{w_1^2 + \lambda_1^2}}{\sqrt{w_2^2 + \lambda_2^2}}.$$

Die Ströme $J_1$ und $J_2$, die in $T_1$ und $T_2$ auftreten, wenn jeder der Transformatoren an die Gesamtspannung $E$ gelegt wird, sind

$$J_1 = \frac{E}{\varrho_1} \quad J_2 = \frac{E}{\varrho_2},$$

also

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{E_2}{E_1}.$$

Für die Winkel $\varphi_1$ und $\varphi_2$ zwischen $E$ und $J_1$ sowie $E$ und $J_2$ gilt

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\lambda_1}{w_1}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\lambda_2}{w_2}.$$

Damit lässt sich das Diagramm (Fig. 205) konstruieren: Die Ströme $J_1$ und $J_2$ werden unter $\varphi_1$ und $\varphi_2$ an $E$ gelegt und ihre Diagonale $OX$ gebildet. Auf

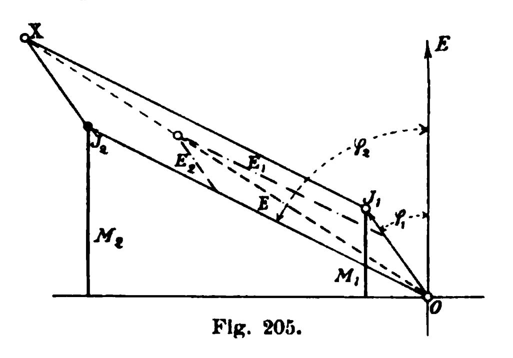



Fig. 205.

$OX$ wird $E$ abgetragen und dann zieht man Parallelen zu $XJ_1$ und $XJ_2$, um $E_1$ und $E_2$ zu bekommen. Die Ströme $J_1$ und $J_2$ lassen sich leicht aus dem Drehstrommotorendiagramm entwickeln.

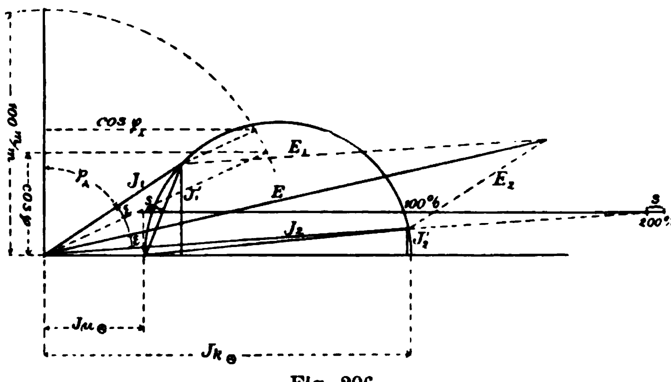


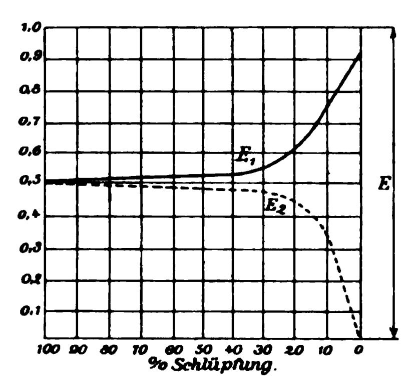

Fig. 206.

Dreht sich der mehrphasig gewickelte Motoranker mit der sekundlichen Umlaufszahl $n_2$ (auf ein Polpaar bezogen), so ist die Schlüpfung für den

rotierenden Transformator $T_1$ gleich $n_1 - n_2 = n_s$, für den anderen $T_2$ ist sie $2n_1 - n_s$ oder in Procenten

$$s = 100 \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ und } \frac{2n_1 - n_s}{n_1} 100 = 200 - s.$$

In Fig. 206 sind in das dem betrachteten Einphasenmotor äquivalenten Drehstrommotorendiagramm der Strom $J_1$ und $J_2$, die zu $s$ und $200 - s$ ge-



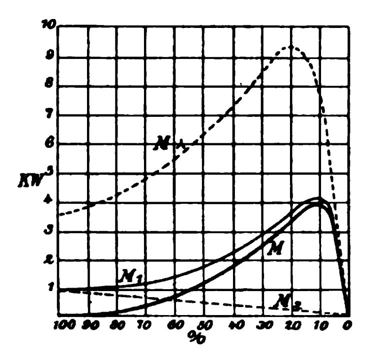
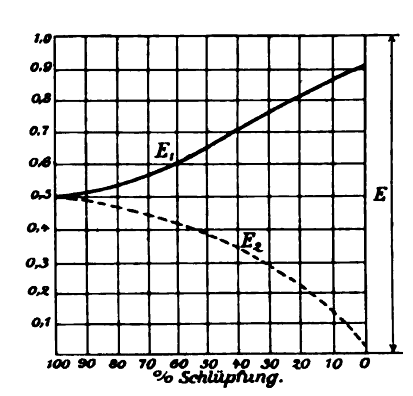




Fig. 207.



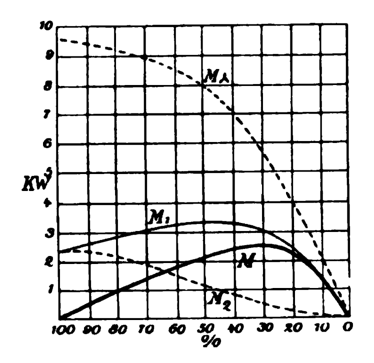




Fig. 208.

hören, eingezeichnet. $J'_1$ und $J'_2$ sind die zugehörigen Wattkomponenten und das Drehmoment des Einphasenmotors[1]) ist

$$M = c\left[J_1'\left(\frac{E_1}{E}\right)^2 - J_2'\left(\frac{E_2}{E}\right)^2\right] = c\,(M_I - M_{II}).$$

Den Phasenwinkel $\varphi$ des Einphasenmotors erhält man, wenn man zu dem $\sphericalangle\ \varphi_1$ des ersten Drehstrommotors den $\sphericalangle\ \varepsilon$ zwischen $E$ und $J_2$ schlägt. Der Strom des Einphasenmotors ist

$$J = \frac{J_1 \cdot E_1}{E}.$$

1) In Fig. 206 ist $J_2 = E_1$, $J_1 = E_2$ gemacht, die wahren Grössen sind durch den Masstab zu berücksichtigen.

In Fig. 207 und 208 sind für zwei verschiedene Rotorwiderstände die Momentenlinien $M_I$, $M_{II}$ und $M$, sowie der Verlauf von $E_1$ und $E_2$ gezeichnet. Fig. 207 gilt für geringeren Rotorwiderstand wie Fig. 208.

Die Eisenverluste des Einphasenmotors sind in der Nähe des Synchronismus annähernd von gleicher Grösse wie beim Drehstrommotor. Genau genommen kommen aber im Stator und Rotor die Eisenverluste, die den Spannungen $E_1$ und $E_2$ entsprechen, in Betracht und zwar für folgende Induktionen und Periodenzahlen, wenn $B_1$ und $B_2$ die Drehfeldinduktionen (Stator und Rotor) sind, die zu $E$ gehören

| | Induktion | Periodenzahl |
|---|---|---|
| Stator | $B\frac{E_1}{E}$ | $n_1$ |
| | $B\frac{E_2}{E}$ | $-n_1$ |
| Rotor | $B\frac{E_1}{E}$ | $n_0$ |
| | $B\frac{E_2}{E}$ | $2n_1 - n_0$ |

Die Statoreisenverluste entsprechen ungefähr dem äquivalenten Drehstrommotor, die Rotorverluste sind grösser.

### δ) Theorie nach Görges.

§ 129. Görges.

Die Theorie der asynchronen Wechselstrommotoren von H. Görges[1]) gestattet einen lehrreichen Vergleich zwischen Ein- und Mehrphasenmotoren. Er setzt im Induktionsmotor einen Magnetismus.

$$m_x = M_x \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad \cdots \quad (180)$$

und einen zweiten, senkrecht dazu

$$m_y = M_y \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \varphi_y\right) \quad \cdots \quad (181)$$

voraus, wobei

$$\mathrm{tg}\,(2\pi\varphi_y) = \frac{\pi z}{w T} + \mathrm{tg}\, 2\pi\vartheta \quad \cdots \quad (182)$$

$$M_y = v \cdot M_x \frac{\sin(2\pi\varphi_y - \vartheta)}{\cos 2\pi\vartheta} \quad \cdots \quad (183)$$

($z$ totale Windungszahl, $w$ Widerstand pro Windung, $T = \frac{1}{n}$, $v$ Motortouren in Procenten des Synchronismus, $\vartheta$ die durch Streuung bedingte Phasenverschiebung im Anker).

1) E. T. Z. 1895.

Das Drehmoment wird allgemein

$$M = -\frac{\pi z}{w T}\left[v\left(M_x^2 + M_y^2\right) - 2 M_x M_y \sin 2\pi\varphi_y\right] \cdot \cos^2 2\pi\vartheta \quad (184)$$

§ 180. Vergleich von Ein- und Mehrphasenmotoren.

Unter Vernachlässigung der Streuung ($\vartheta = 0$) wird das Moment $M_m$ des Mehrphasenmotors

$$M_m = \frac{\pi z}{w T} M_x^2 (1 - v) \quad \ldots \ldots \quad (185)$$

dasjenige $M_e$ des Einphasenmotors $\left(2\pi\psi_y = \frac{\pi}{2}\right)$

$$M_e = \frac{\pi z}{w T} M_x^2 \frac{(1 - v^2)\, v}{2} \quad \ldots \ldots \quad (186)$$

also

$$\frac{M_e}{M_m} = \frac{(1 + v)\, v}{2} \quad \ldots \ldots \quad (187)$$

Die Ankerstromwärme $Q$ ist

$$Q = \frac{\pi^2 z}{w T^2}\left[\left(M_x^2 + M_y^2\right)\left(1 + v^2\right) - 4 M_x M_y v \sin 2\pi\varphi_y\right] \cos^2 2\pi\vartheta \quad (188)$$

worin ähnlich wie eben

$$Q_m = \frac{2\pi^2 z}{w T^2} M_x^2 (1 - v)^2 \quad \ldots \ldots \quad (189)$$

$$Q_e = \frac{\pi^2 z}{w T^2} M_x^2 \left(1 - v^2\right)^2 \quad \ldots \ldots \quad (190)$$

$$\frac{Q_e}{Q_m} = \frac{(1 + v)^2}{2} \quad \ldots \ldots \quad (191)$$

## d) Anlassvorrichtungen.

§ 181. Allgemeines über Anlassvorrichtungen.

Da der Einphasen-Induktionsmotor bei Stillstand kein Drehmoment entwickelt, so ist er mit einer mechanischen oder elektrischen Anlassvorrichtung zu versehen. Man kann den Motor z. B. durch die Transmission oder durch einen selbstanlaufenden Hilfsmotor in Betrieb bringen. Die elektrischen Vorrichtungen bestehen darin, dass man dem Motor ausser der Hauptwicklung eine dagegen verschobene Hilfswicklung einfügt und auf irgend eine Weise dafür sorgt, dass die Ströme in beiden Wicklungen gegeneinander phasenverschoben sind. Diese Verschiebung wird durch drei Mittel bewirkt: Durch induktionsfreien Widerstand oder durch Selbstinduktion oder durch Kapazität. Schaltet man in eine Wicklung Kapazität ein, so wird eine Phasenvoreilung hervorgerufen, bei Selbstinduktion eine Phasennacheilung; Widerstand vermindert prozentuell die gesamte Selbstinduktion eines Kreises. Am günstigsten ist es Kapazität in eine Wicklung und Selbstinduktion in die andere einzufügen. Sind die beiden Wicklungen räumlich um den $\measuredangle\ \varepsilon$ gegeneinander versetzt (der doppelte Polabstand entspreche $2\pi$) und ist $K_1 \sin(\omega t)$ das Hauptfeld und $K_2 \sin(\omega t - \psi)$ das Hilfsfeld, so resultiert ein pulsierendes (elliptisches) Drehfeld (192)

$$K_d = \sqrt{K_1^2 \sin^2 \omega t + K_2^2 \sin^2(\omega t - \psi) + 2 K_1 K_2 \sin \omega t \sin(\omega t - \psi) \cos \varepsilon}.$$

Dieses Drehfeld rotiert mit variabler Geschwindigkeit. Es ist anzustreben

$$\psi = 90^0$$

und da dies kaum ganz erreichbar

$$K_2 > K_1.$$

§ 189. Anlassvorrichtung von Oerlikon.

In Fig. 209 ist das Anlaufsschema der Einphasenmotoren der Maschinenfabrik Oerlikon gezeichnet. In der Hilfswicklung liegt eine Induktionsspule

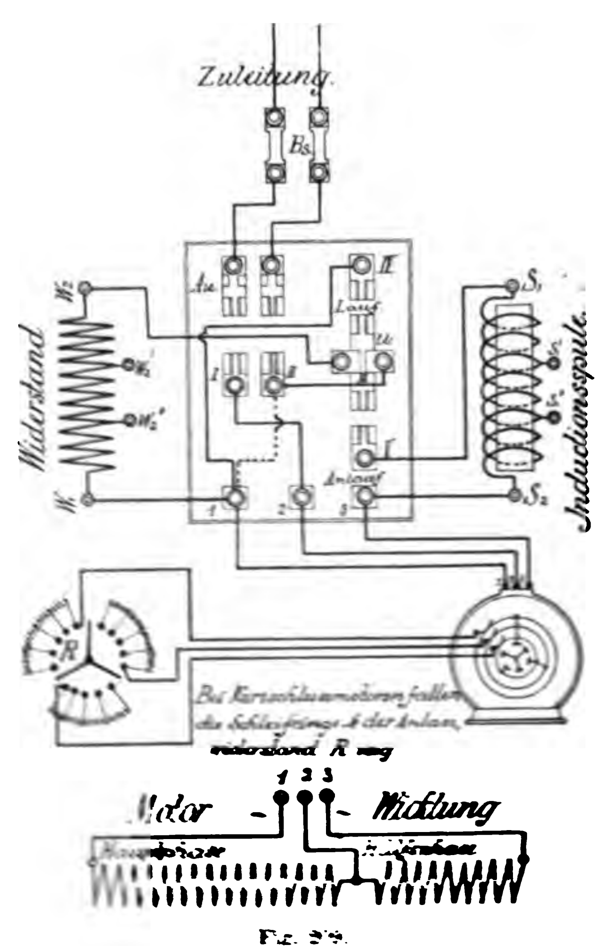



Fig. 209.

mit Eisenkern (nicht eisengeschlossen), in der Hauptwicklung ein Widerstand. Im Anker ist ein dreiteiliger Anlasser vorgesehen, da für Einphasenmotoren zur Erzielung eines hohen Anzugsmomentes noch wesentlicher ist als bei Mehrphasenmotoren. Der Anlass[illegible] ist in Fig. 211 [illegible] abgebildet.

Das Drehmoment der Oerlikon-Motoren mit Kurzschlussankern beim Anlauf beträgt ungefähr [illegible], wenn die Anlaufstromstärke [illegible] über der normalen Betriebsstromstärke gehalten wird. Bei Motoren mit [illegible] steigt die Anzugskraft auf [illegible] der normalen bei normaler Stromstärke.

Drei Anlassschaltungen der Gen. El. Co. für Einphasenmotoren, wozu einfach die normalen Drehstrommodelle verwendet werden, sind in Fig. 211 bis 213 skizziert. In der ersten Abbildung ist ein induktionsfreier regelbarer Widerstand $R$ und eine Drosselspule $J$ vorgesehen, in der zweiten ein Kondensator $C$, eine Drosselspule $J$ und ein regelbarer Widerstand $R$ und in der letzten eine Selbstinduktion $J$ und eine Kapazität $C$ hinter einem in die Höhe transformierenden Transformator $T$.[1])

§ 133. Anlassvorrichtung der Gen. El. Co.

Die SIEMENS & HALSKE A.-G. hat sich die Brückenschaltung Fig. 214 patentieren lassen: Zwei Zweige enthalten Widerstand oder Kapazität, die zwei anderen Selbstinduktion. $D$ ist die Hilfsphase, $M$ die Hauptphase. Die Wechselspannung an $D$ ist gegen diejenige an $M$ um $90^0$ verschoben, wenn

§ 134. Siemens & Halske.

$$w_1^2 + w_2^2 = (2 \pi n L_2)^2,$$

was aus dem Diagramm Fig. 215 abgelesen werden kann.



Fig. 210. Umschalter für Einphasenmotoren der Maschinenfabrik Oerlikon.

Um ausserhalb des Motors liegende Anlassapparate zu vermeiden, kann man die Wicklungen an sich so anordnen, dass die Ströme in ihnen phasenverschoben sind, d. h. man giebt z. B. der Hilfswicklung eine grössere Selbstinduktion bezw. eine grössere Streuung als der Hauptwicklung, was sich durch entsprechende Änderung der Windungszahl, der Nutenform und Nutenzahl erreichen lässt. Besonders beachtenswert ist in dieser Hinsicht der Einphasenmotor von HEYLAND, dessen Hilfswicklung in wenigen, grossen Nuten untergebracht ist, wobei die Windungszahl kleiner als die der Hauptwicklung ist. Man kann auch die Hilfswicklung im Nutengrund unterbringen und die Hauptwicklung darüber, so dass letztere geringere Streuung zeigt. Es lässt sich auch Ringwicklung (grössere Streuung) für die Hilfswicklung und Trommel-

§ 135. Besondere Motorwicklungen.

1) Die Anlassvorrichtung D. R. P. 100291 von F. TISCHENDÖRFER besteht aus zwei Drosselspulen auf gemeinsamem Eisenkern. Die Windungszahlen der Drosselspulen lassen sich so abgleichen, dass man für die beiden Motorwicklungen eine gewisse Phasenverschiebung erzielt.

wicklung für die Hauptwicklung kombinieren oder man schaltet zu einzelnen Teilen der Wicklung Kondensatoren parallel.

Es wird wohl auch zum Anlassen ein Teil der Hauptwicklung abgeschaltet, so dass das Hauptfeld

$$K_1 = \frac{E_1}{c \cdot n_1 Z_1}$$

verstärkt wird (durch Verringerung von $Z_1$). Dabei wird der Anlaufstrom unter sonst gleichen Verhältnissen grösser. Ratsam ist es stets einen drei-

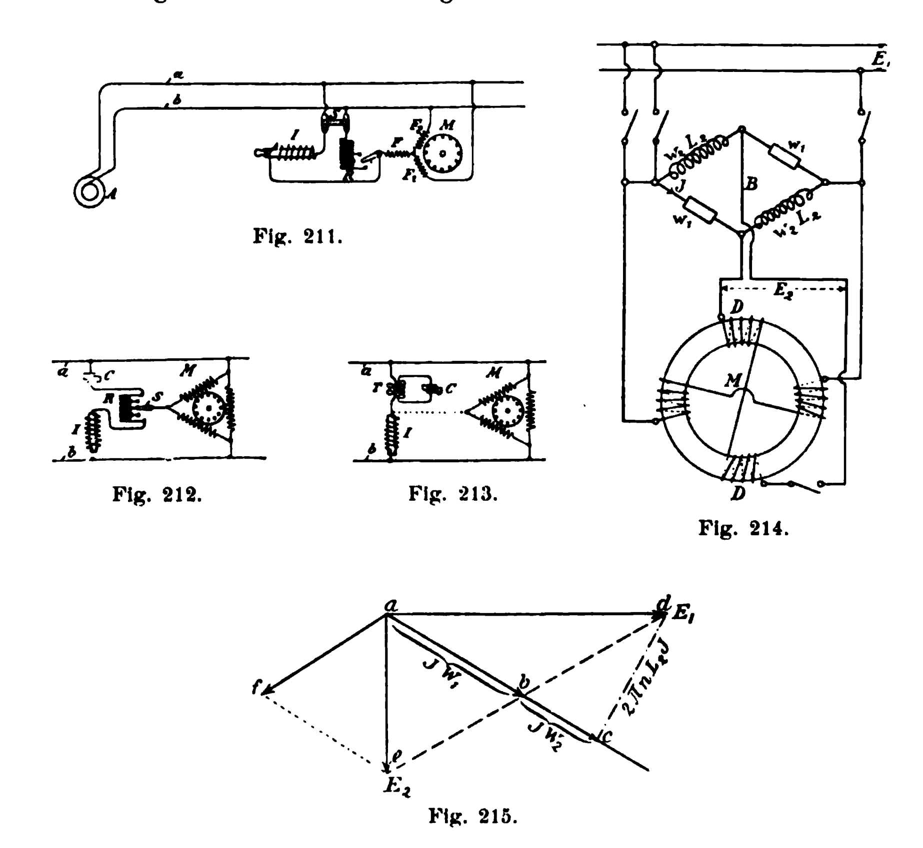


Fig. 211.

Fig. 212.

Fig. 213.

Fig. 214.

Fig. 215.

teiligen Anlasser in den Anker zu legen; es ist dann nicht schwer, bei etwa zweifachem Stromverbrauch (gegen Volllast) das normale Moment beim Anlauf zu erzielen; bei Kurzschlussläufern muss man sich häufig bei zwei bis dreifachem Stromverbrauch mit $^1/_2$ bis $^3/_4$ des normalen Moments begnügen.

Um mit dem Anzugsmoment zugleich den cos $\varphi$ zu heben, hat Bradley in den Anker statt der Widerstände Kondensatoren mit Abstufung geschaltet. Zur Arbeitsersparnis kann bei geringer Belastung (Leerlauf) die Hilfsphase hinter die Hauptphase geschaltet werden (Kummer & Co).

§ 136. Ferraris & Arno.

Ferraris & Arno benutzen zum Anlassen einer grösseren Motorgruppe einen der Motoren, der mit einer der besprochenen Anlassvorrichtungen versehen ist und primär eine Zweiphasenwicklung trägt, wovon nur die eine Phase am Netz liegt. Die andere speist im Augenblick des Anlassens jeden der übrigen Motoren des Netzes. Die letzteren brauchen natürlich keine be-

sonderen Hilfsapparate. Der Motor, der den phasenverschobenen Strom liefert, muss ungefähr der grösste Motor im betreffenden Netz sein.

Bringt man auf dem Anker des Einphasenmotors einen Kollektor an, so kann man ihn als sogenannten Konduktionsmotor anlassen (siehe die nächsten Kapitel). Der Kollektor kann für den Dauerbetrieb abgeschaltet werden.

§ 137. Steinmetz.

Zur Erhöhung des cos $\varphi$ von Einphasenmotoren legt die Gen. El. Co. nach Fig. 216 eine besondere Wicklung in den Ständer, die auf einen regelbaren Kondensator geschlossen ist. In Fig. 217 ist ein Dreiphasenmotor für

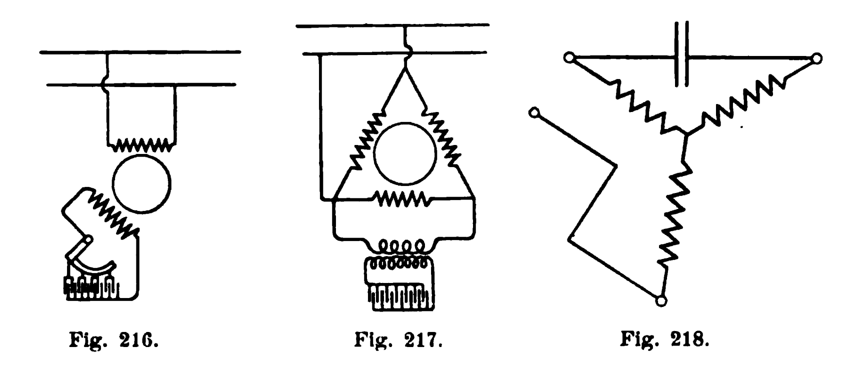


Fig. 216. Fig. 217. Fig. 218.

Einphasenbetrieb gezeichnet. Der Kondensator liegt dabei hinter einem aufwärts transformierenden Transformator. Es ist nach STEINMETZ äusserst wichtig, den Kondensator erst in eine besonders induzierte Wicklung zu schalten und nicht parallel zum Motor, da dadurch die höheren harmonischen Glieder, die der Kondensator an sich verstärken würde, abgedämpft werden.

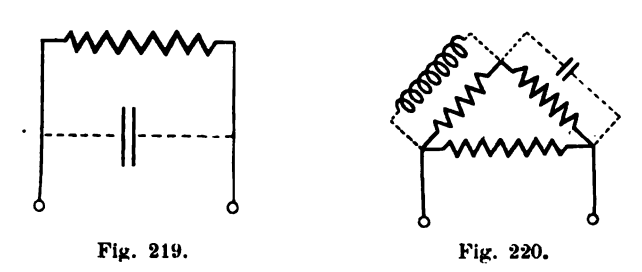


Fig. 219. Fig. 220.

Eine Schaltung, die sowohl ein gutes Anzugsmoment als auch eine Verbesserung des cos $\varphi$ für den Dauerlauf giebt, zeigt eben Fig. 217 (tertiary circuit motor) und Fig. 218.

Eine interessante Zusammenstellung von Versuchen an einem und demselben Induktionsmotor giebt STEINMETZ in Tr. Am. Inst. El. Eng. Jan. 1900:

1) Dreiphasig

Maximaler Wirkungsgrad ($\eta_{max}$) = 89 %

" cos $\varphi$ (cos $\varphi_{max}$) = 79 %

Maximale Leistung $A_{max}$ = 2700 Watt.

2) Einphasig

$$\eta_{max} = 83\ \%$$

$$(\cos\varphi)_{max} = 73\ \%$$

$$A_{max} = 1500 \text{ Watt.}$$

3) Einphasenmotor mit Kondensator parallel zum Motor (Fig. 219). Schlechte Anordnung, da wohl die nacheilenden Ströme aber nicht der magnetisierende Strom kompensiert wird, so dass auch nicht $A_{max}$ vergrössert wird. Überdies werden die höheren harmonischen Glieder verstärkt.

4) Einphasig mit Kondensator nach Fig. 217

$$\eta_{max} = 80\ \% \text{ (gering!)}$$

$$(\cos\varphi)_{max} = 100\ \% \text{ (hoch!)}$$

$$A_{max} = 1800 \text{ Watt.}$$

Max. Anzugsmoment = 800 Synchronwatt bei grossem Ankerwiderstand.

5) Einphasig mit Kondensator und Reaktanz nach Fig. 220

$$\eta_{max} = 86\ \%$$

$$(\cos\varphi)_{max} = 97\ \%$$

$$A_{max} = 2700 \text{ Watt}$$

Anzugsmoment wie bei (1).

# VI. Induktionsmotoren mit Kollektor.

§ 188. Kollektor-motoren.

Um dem einphasigen Induktionsmotor ein Anzugsmoment zu verleihen, ist der Anker desselben hin und wieder nach Art eines Gleichstromankers hergestellt worden (Repulsionsmotor): Fig. 221[1]). Die Wicklung ist mit einem vielteiligen Kollektor $C$ verbunden. Die Bürsten, deren Verbindungslinie unter 45° gegen die Feldachse verschoben liegt, werden beim Anlauf durch einen Widerstand verbunden und nachher kurzgeschlossen. $F$ ist die am Netz liegende Feldwicklung. Die Bürsten können auch unverbunden bleiben und einfach einen Teil der Kollektorlamellen überbrücken.

In Fig. 222 sind nach ATKINSON[2]) eine Reihe Induktionsmotoren mit Bürsten gezeichnet. Die Bürstenlinie $b\,b$ fällt mit der vom Netze erregten Feldrichtung $f$ zusammen. Zur Erzielung eines Drehmomentes ist noch eine zweite Feldrichtung $h \perp f$ erforderlich. Dieses zweite phasen- und räumlich verschobene Feld liefert in Fig. 222 $A$ der Anker selbst, Anker und Hilfsfeld sind

1) STEINMETZ, Alternating Current Phenomena.
2) Minutes of Proceedings Inst. C. E.

in Phase. In Fig. 222 *B* ist der Anker kurzgeschlossen, aber *f* und *h* werden hintereinander vom Netze gespeist (Serienmotor). Die Fig. 222 *C* giebt einen Nebenschlussmotor, *h* und *f* liegen parallel. Der Motor Fig. 222 *D* zeigt primär eine gewöhnliche Zweiphasenwicklung, *h* und *f* werden gesondert vom Netz erregt. Für den Motor Fig. 222 *E* liegt das senkrechte Feld *h* im Anker selbst, 90° gegen *bb* verschoben. Es lassen sich nicht nur zwei (magnetische) Feldachsen, sondern auch zwei senkrecht stehende Ankerkreise anordnen: Fig. 222 *F*.

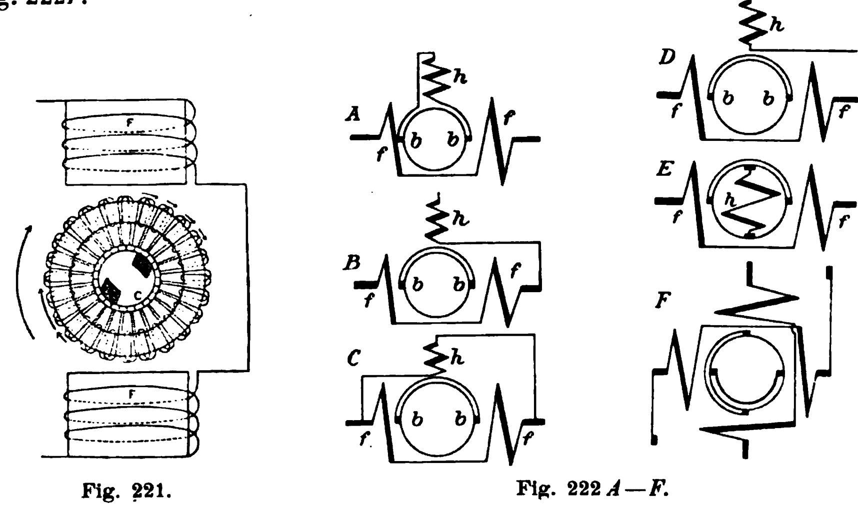



Fig. 221. Fig. 222 *A*—*F*.

§ 189. Theorie.

Ist[1]) $E_1$ die elektromotorische Kraft der Feldwicklung *F* (Fig. 221), so ist

$$E_1 = 4{,}44\, n_1 z_1 K \cdot 10^{-8} \quad \dots\dots \quad (193)$$

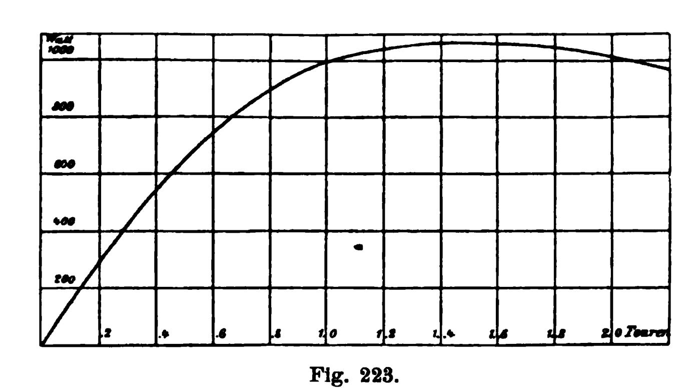


Fig. 223.

wenn $n_1$ die primäre Frequenz, $z_1$ die primäre Windungszahl und $K$ das Magnetfeld ist. Die sekundäre EMK auf den primären Kreis reduziert wird bei einem Bürstenwinkel von 45°

$$E_2 = -E_1 \sqrt{\frac{1+s^2}{2}} \quad \dots\dots\dots \quad (194)$$

1) Folgender theoretischer Abriss ist STEINMETZ „Alternating Current Phenomena" entlehnt.

$$s = \frac{n_2}{n_1} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (195)$$

($n_2$ sekundliche Tourenzahl des Ankers mal Polpaare).

$\mathfrak{z}_2 = r_2 - jx_2$ sei die sekundäre, $\mathfrak{z}_1 = r_1 - jx_1$ die primäre Impedanz und $Y = g + jb$ die primäre Admittanz. Der sekundäre Strom ist

$$J_2 = -\frac{E_1}{\sqrt{2}} \frac{1 + js}{r_2 - jx_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (196)$$

Primär ist

$$J_1 = E_1 \left( g + jb + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 + js}{r_2 - jx_2} \right) \quad \ldots \quad (197)$$

Die Klemmenspannung wird

$$E_k = \frac{E_1 \sqrt{(r_1 + r_2 \sqrt{2} + sx_1)^2 + (x_1 + x_2 \sqrt{2} - sr_1)^2}}{\sqrt{2} (r_2^2 + x_2^2)} \quad \cdot \quad (198)$$

Die mechanische Leistung $A_m$ wird

$$A_m = \frac{E_k^2 \left[ r_2 (\sqrt{2} - 1) + sx_2 \sqrt{2} - s^2 r_2 \right]}{(r_1 + r_2 \sqrt{2} + sx)^2 + (x_1 + x_2 \sqrt{2} - sr_1)^2} = \sim \frac{E_k^2 s x_2 \sqrt{2}}{(x_1 + x_2 \sqrt{2})^2 + s^2 x_1^2} \quad (199)$$

Fig. 223 giebt die Leistung $A_m$ (Watt) in Abhängigkeit der Tourenzahl

$$s = \frac{n_2}{n_1};$$

das Maximum liegt bei

$$s = 1 + \frac{x_2}{x_1} \sqrt{2}.$$

## VII. Konduktionsmotoren.

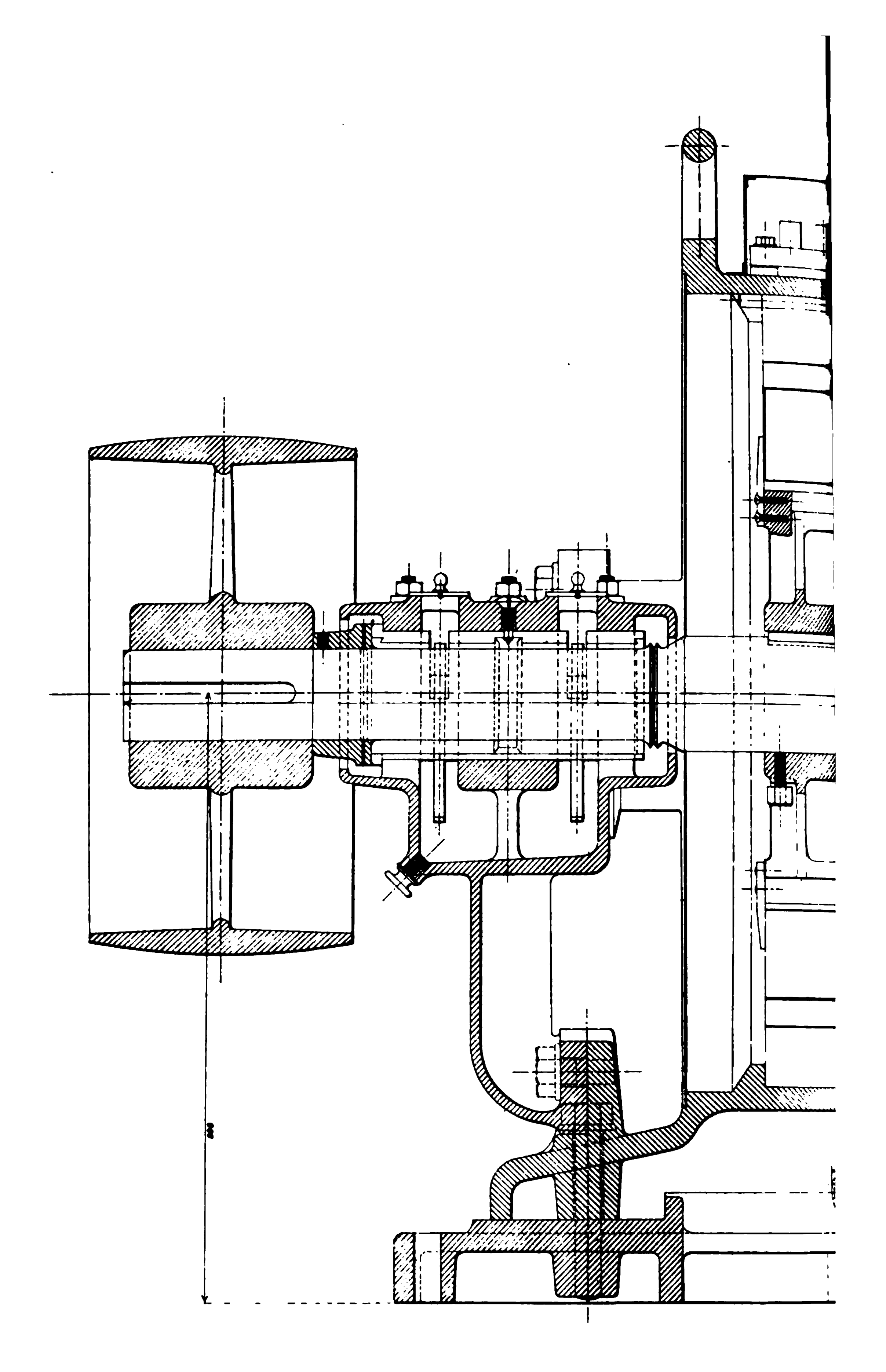
§ 140. Konduktionsmotoren (Serienmotor).

Die Konduktionsmotoren (conductive motors nach Atkinson) gleichen in vieler Hinsicht den Gleichstrommotoren, nur mit dem unwesentlichen Unterschiede, dass das Feldgestell unbedingt lamelliert sein muss. Es handelt sich um einen gewöhnlichen Gleichstromanker und eine Feldwicklung, die entweder parallel (Nebenschlussmotor Fig. 224) oder in Hintereinanderschaltung [Serienmotor Fig. 225a[1])] zum Anker liegt. Diese Motorgruppe läuft gewöhnlich mit kräftigem Moment an. Nach Steinmetz gilt für einen Serienmotor

$$J = \frac{E_k}{\sqrt{\left( \frac{2}{\pi} \frac{z_2}{2p\, z_1} \frac{n_2}{n_1} x_1 + r_1 + r_2 \right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad \cdot \cdot \quad (200)$$

$z_2$ Ankerwindungen, die zwischen den Bürsten hintereinanderliegen, $z_1$ primäre Windungen, die übrigen Grössen wie beim vorigen Motor.)

1) Nach Steinmetz.



'h. d. Elektrotechnik IX. Bd.

## Drehstrommotor von Kummer & Co.

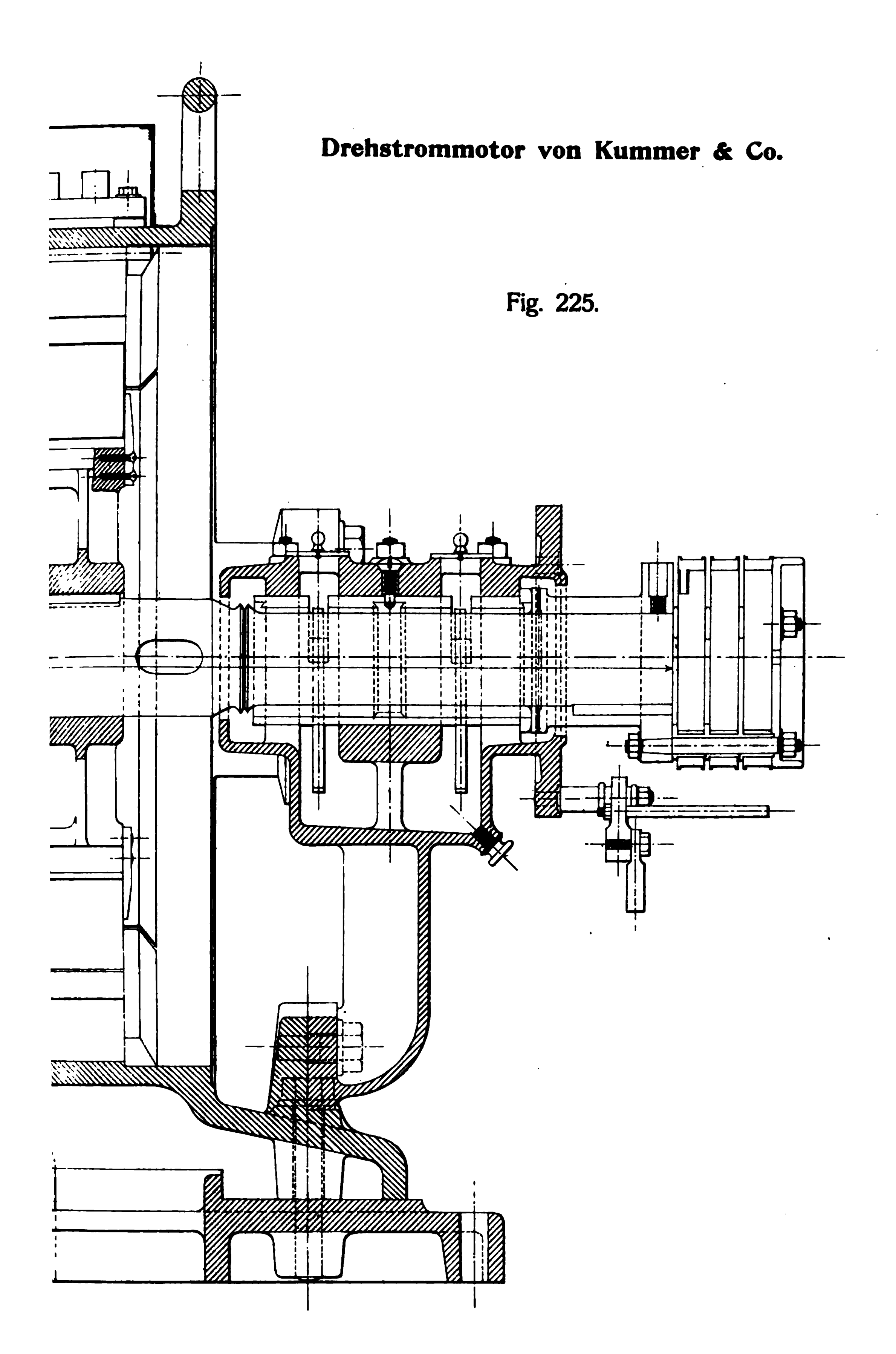


Fig. 225.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Die mechanische Leistung ist

$$A_m = \frac{\frac{2}{\pi} \frac{z_2}{2p\, z_1} \frac{n_1}{n_2} x_1\, E_k^2}{\left(\frac{2}{\pi} \frac{z_2 n_2}{2p\, z_1 n_1} x_1 + r_1 + r_2\right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad . \; . \; . \quad (201)$$

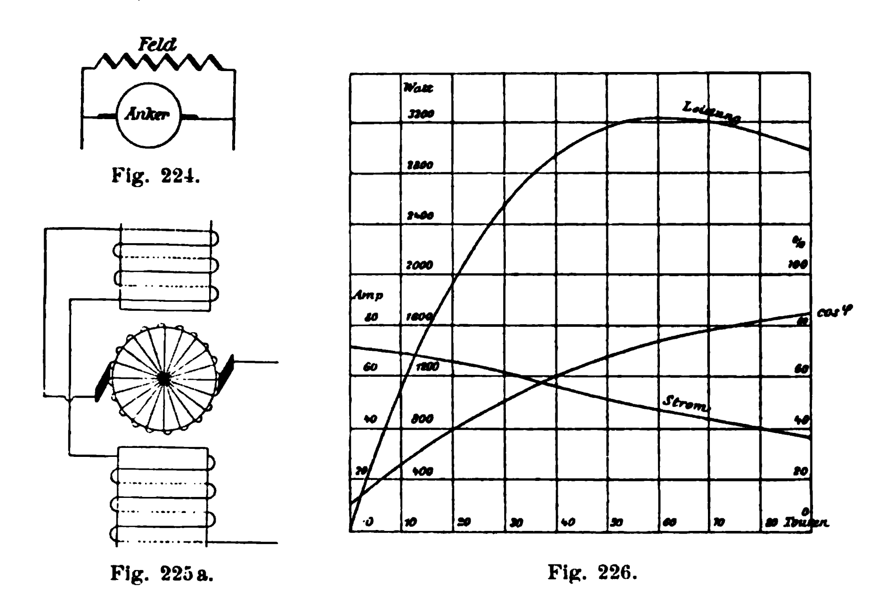



Fig. 224.

Fig. 225a.

Fig. 226.

Der Leistungsfaktor cos $\varphi$ findet sich aus

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_1 + x_2}{\frac{2}{\pi} \frac{z_2}{2p\, z_1} \cdot \frac{n_2}{n_1} x_1 + r_1 + r_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (202)$$

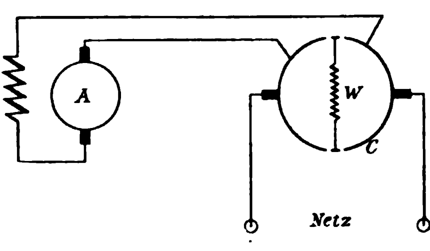



Fig. 227.

Die Fig. 226 [1]) giebt in Abhängigkeit der Tourenzahl $n_2$ die Werte der Leistung $A_m$, von cos $\varphi$ und von $J$.

Die Tourenzahl des Serienmotors variiert mit der Last, sie kann durch Vorschaltwiderstand oder durch Bürstenverschiebung reguliert werden.

Der Motor Fig. 227 läuft bei Synchronismus gerade wie ein Gleichstrommotor, da der Feld- und Ankerstrom kommutiert wird und der Anker einen gewöhnlichen Gleichstromkollektor trägt.

---

1) Nach STEINMETZ.

# VIII. Reaktionsmotoren.

§ 141. Hysteresismotor.

Wenn eine Eisenscheibe innerhalb eines Drehfeldes drehbar angeordnet wird, so dreht sich dieselbe selbst bei völligem Ausschluss von Wirbelströmen vermöge der Phasenverschiebung durch Hysteresis.

Das Moment[1]) ist proportional sin $\alpha$, der Wirkungsgrad ist $(1 - s)$ sin $\alpha$, also sehr gering, da $\alpha$ stets klein ist. $\left(s \text{ ist } \frac{n_s}{n_1}, \text{ die prozentuelle Schlüpfung.}\right)$

§ 142. Theorie der Reaktionsmotoren.

In ähnlicher Weise wie hier bei der Stromverzerrung durch Hysteresis tritt in Wechselstrommaschinen ein Moment auf, wenn die Reaktanz derselben pro Cyklus variabel ist, z. B. mit der doppelten Frequenz des Wechselstromes

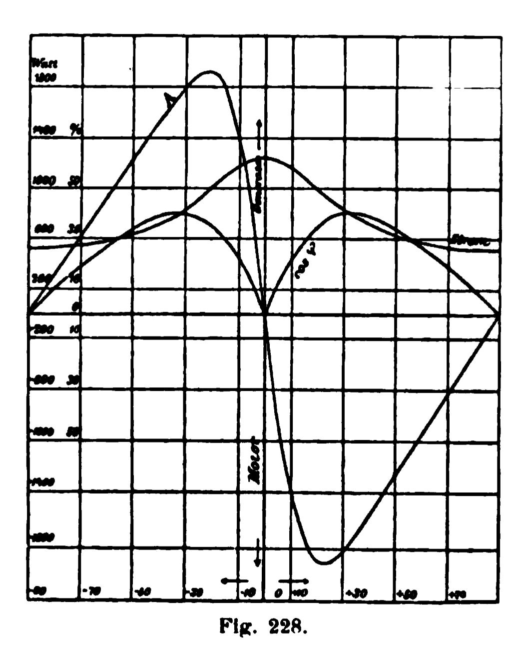


Fig. 228.

variiert. Der geleistete Effekt dieser verzerrten Reaktanz kann positiv [Generator[2])] oder negativ (Motor) sein. Bei zu vernachlässigenden Ohmschen Widerständen gilt für die Reaktionsmaschine nach Steinmetz: Der Strom $J$ ist

$$J = \frac{E}{x\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4} - \gamma \cos 2\omega}} \quad \cdots\cdots \quad (203)$$

wenn $L = l\,(1 + \gamma \cos 2\,\vartheta)$ der variable Selbstinduktionskoeffizient und $x = 2\pi n l$ ist; $\omega$ bezeichnet den Verschiebungswinkel des maximalen Wertes

1) Die mechanische Arbeit ist einfach gleich der Hysteresisarbeit

$$V \cdot A_H = \sim V \cdot \eta B^{1,6}$$

in der Scheibe.

2) Jeder Wechselstromgenerator oder Synchronmotor kann als Reaktionsmaschine Arbeit leisten.

von $L$ gegen den minimalen. $E$ ist die EMK der Reaktionsmaschine. Die mechanische Leistung $A_m$ wird

$$A_m = \frac{E^2 \gamma \sin 2\omega}{2x\left(1+\frac{\gamma^2}{\varphi}-\gamma\cos 2\omega\right)} \quad \ldots\ldots \quad (204)$$

und der Leistungsfaktor cos ($EJ$)

$$\cos(EJ) = \frac{\gamma \sin 2\omega}{2\sqrt{1+\frac{\gamma^2}{\varphi}-\gamma\cos 2\omega}} \quad \ldots\ldots \quad (205)$$

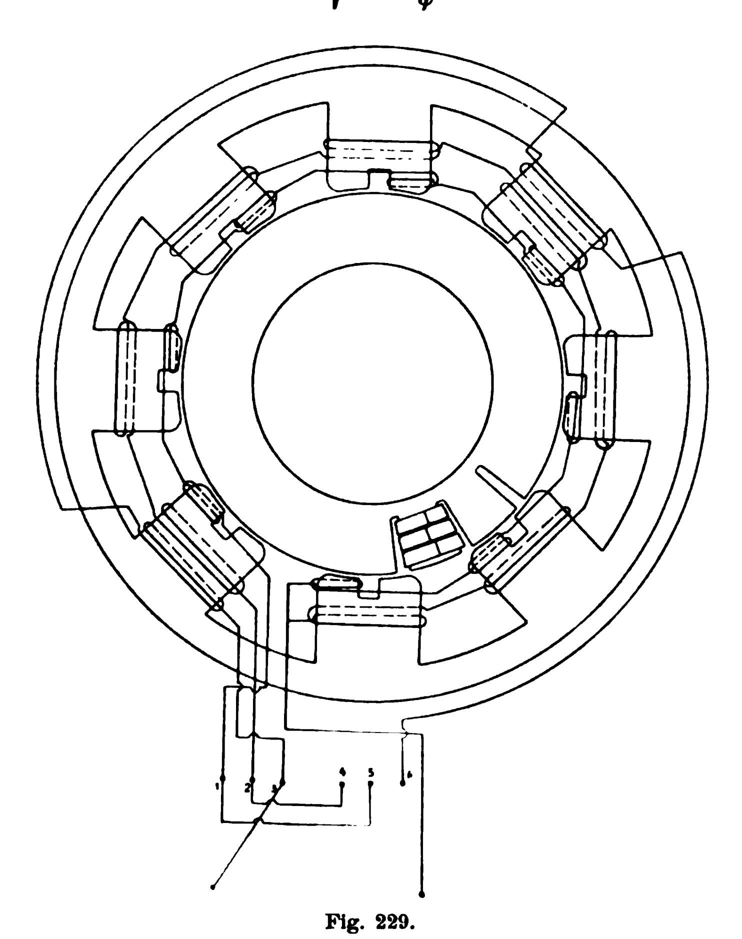



Fig. 229.

Die Fig. 228 giebt als Beispiel die Betriebskurven für eine Reaktionsmaschine und zwar die mechanische Leistung $A_m$, den Strom $J$ und den Leistungsfaktor cos ($EJ$) = cos $\varphi$ in Abhängigkeit des Winkels $\omega$. Dabei ist

$$E = 110,\ x = 3 \text{ und } \gamma = 0{,}8.$$

§ 148. Schirmspulen.

Hier lässt sich unter anderem noch der für kleine Grössen verwendete Einphasenmotor von E. Thomson mit Schirmspulen nach Art der Fig. 229 einschieben. Auf jedem Polvorsprung sitzt ausser der am Netz liegenden Spule noch eine kurzgeschlossene Spule, die nur einen Teil des Poles umfasst.

Hiermit erzielt man phasenverschobene Ampèrewindungen, die Veranlassung zu einem Anzugsmoment werden. FERRANTI & WRIGHT und andere haben in ähnlicher Weise die schirmende Wirkung der Wirbelströme und kurzgeschlossener Spulen benutzt.

## IX. Beispiele moderner Wechsel- und Drehstrommotoren.

§ 144. A. E.-G. Berlin.

Nach Z. V. D. J. 1898 p. 1347 ist in Fig. 230 ein Drehstrommotor der A. E.-G. Berlin für eine unterirdische Wasserhaltung gezeichnet. Derselbe ist für 750 PS, 2000 Volt, 49 Wechsel (24,5 Perioden) und 180 Touren

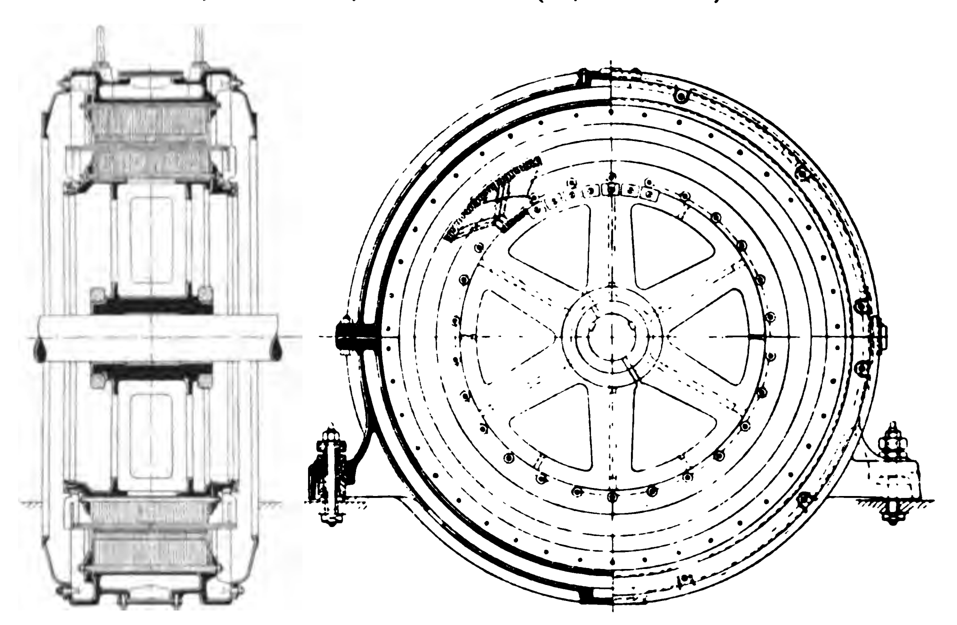


Fig. 230. 750 PS Motor der A. E.-G.

gebaut. Der Anker trägt eine in sich kurzgeschlossene Stab-Gabelwicklung.[1]) Stator- und Rotorbleche sind durch Bolzen, welche das aktive Eisen durchsetzen zusammengehalten. Die Rotorgabeln sind durch schwalbenschwanzförmige Stücke gehalten. Die Nabe ist gesprengt und durch Schrumpfringe gehalten. Die Fig. 230a zeigt eine kleinere Type mit dreiarmigen Lagerschildern. Der Motor hat fünf Nuten pro Pol und Phase, der Rotor ist mit Gleichstrom-Serien-Stabwicklung ausgeführt. Die Bürsten sind abhebbar, vor dem Abheben wird der Anker durch einen besonderen Schalter kurzgeschlossen. Von $^1/_8$ bis 5 PS verwendet die A. E.-G. Motortypen nach

1) Die A. E.-G. lässt sich neuerdings Gehäuse für grössere Maschinen schützen, die nur aus zwei Seitenwangen ohne verbindendes Gussstück bestehen. Das aktive Eisen ist gar nicht abgedeckt. Die Seitenwangen bleiben bei allen Breiten dieselben. Der rotierende Teil wird so hergestellt, dass der äussere Ring für sich die Centrifugalkraft aufnimmt, ohne die Arme zu beanspruchen, d. h. er ist radial beweglich, eine Konstruktion, die indes kaum ganz neu ist.

Fig. 230b. Die Füsse sind an die Schilder angegossen. Für die beiden extremen Motoren gelten die folgenden Masse:

| Grösse | P.S. | Umdrh. pro Minute | a | b | c | d | h | i | f | g | l | o | e | q Durchg. | B | D |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $KD_2$ | $^1/_8$ | 1440 | 225 | 110 | 280 | 150 | 140 | 305 | 115 | 140 | 280 | 16 | 270 | $^1/_2$" | 40 | 100 |
| $LKD_{50}$ | 5 | 960 | 430 | 215 | 520 | 280 | 285 | 620 | 185 | 255 | 510 | 40 | 560 | $^7/_8$" | 130 | 150 |

l ist die Gesamtlänge, o Wellenstumpfdurchmesser, q Befestigungsbolzen, B und D sind die Riemenscheibenmaasse. I bedeutet Ausführung mit einfacher Riemenscheibe, II mit Doppelriemenscheibe, III für direkte Kupplung, IV mit Stufenscheibe.

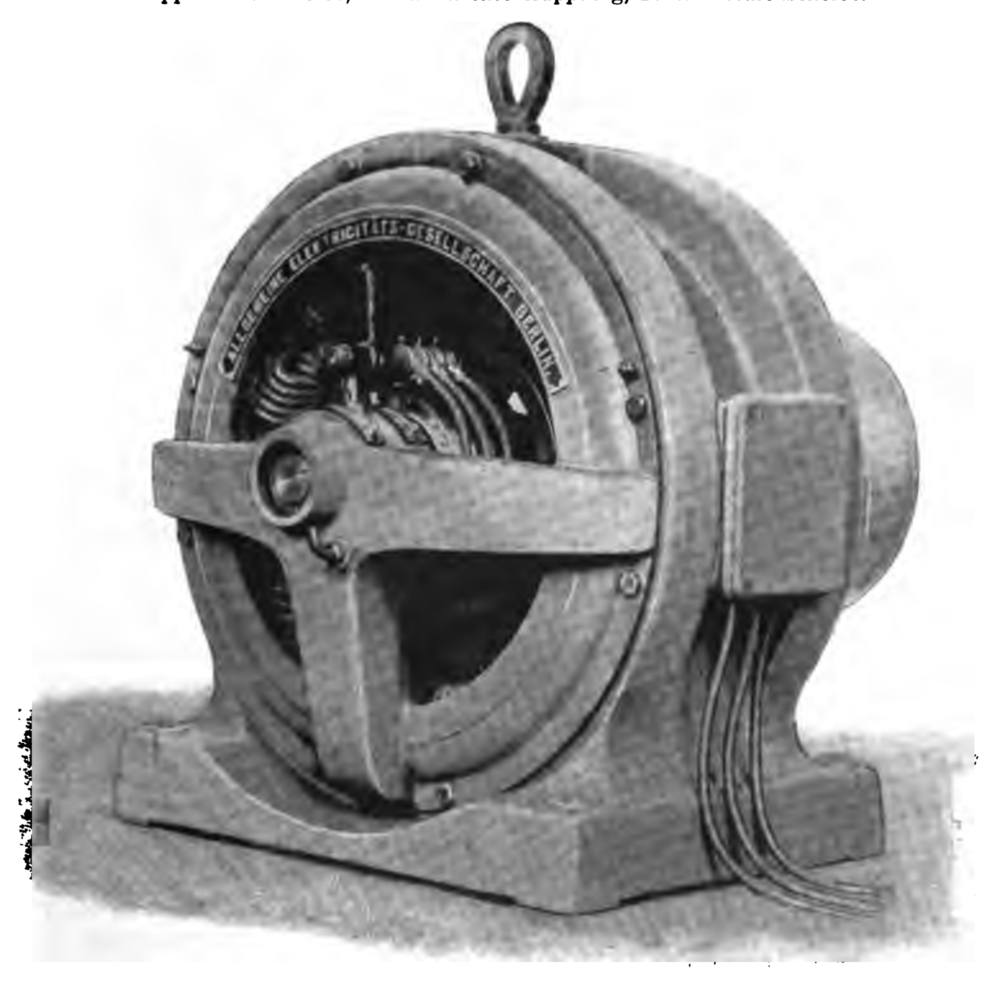



Fig. 230a. Drehstrommotor der A. E.-G.

Die A. E.-G. baut noch eine Motortype für $^1/_{40}$ PS.

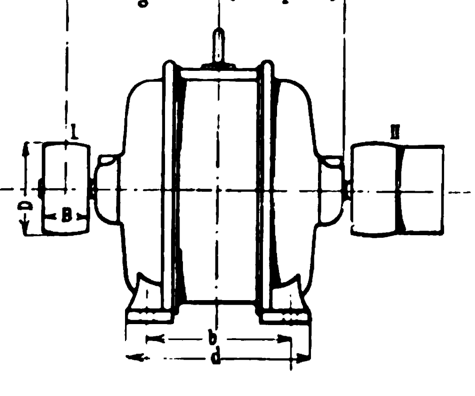
§ 145. Helios.

In Fig. 230c ist ein kleiner Drehstrommotor der Firma Helios-E. G. auseinandergenommen, so dass die mit Draht hergestellte Feldwicklung und der Kurzschlussanker deutlich zu erkennen sind. Die Stator- und Rotornuten sind ganz geschlossen. Fig. 230d giebt Durchschnitt und Stirnansicht eines solchen Motors für 3 PS (Ankerdurchmesser = $\sim$ 230 mm). Die Ankerbleche mit radialen Ventilationskanälen sind direkt auf die Achse geschoben.

§ 146. Kummer.

Die Statorbleche des Drehstrommotors Fig. 225 und 230e der A. G. E. vorm. Kummer & Co. werden durch radiale Schrauben und runde Keile gehalten. Die Nutenzahl ist so gewählt, dass sie für zwei und drei Phasen passt. Die Rotorbleche werden auf einen Armstern mit eingelegten Rundkeilen geschoben. Der Anker läuft in zwei dreiarmigen Lagerschildern. Der Luftspalt ist bei ca. 800 mm Ankerdurchmesser 1 mm.

In Fig. 230f ist ein Drehstrommotor fertig installiert: Das Klemmbrett sitzt abgedeckt oben auf dem Motor. Die Endseiten sind durch perforierte



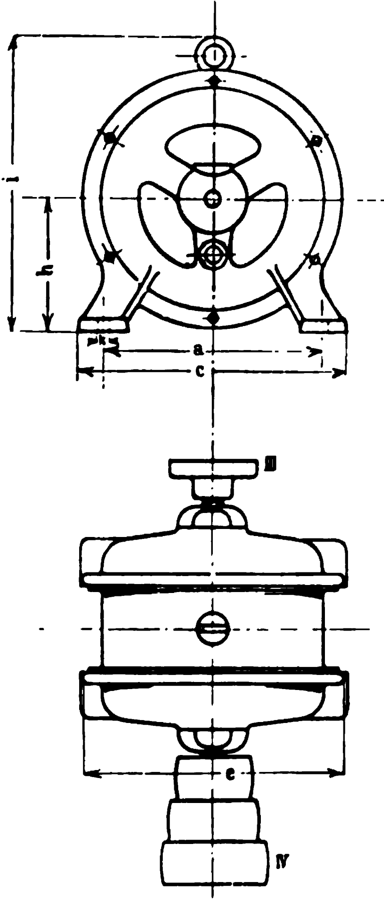




Fig. 230b. Kleiner Drehstrommotor (A.E.-G).

Schutzbleche abgeschlossen. Die Schleifringe mit je einer Metall- und einer Kohlenbürste liegen ausserhalb der Lager. Sie sind mit Schutzringen versehen. Im Ankerkreis liegt ein zweiphasiger Flüssigkeitswiderstand. Zum Antrieb des Chargierkranes (Fig. 230g) sind vier Drehstrommotoren verwendet. Die Übersetzung erfolgt durch Schneckengetriebe und vorgelegte Lederkupplung. Die Anlasser und die vier Steuerhebel sind vorne auf dem Trittbrett sichtbar. Der einphasige Synchronmotor (Aussenpoltype, Fig. 230h) betreibt mittelst Lederkupplung eine vierpolige Gleichstromdynamo, deren Polschuhe durch perforiertes Blech überbrückt sind.

§ 147. Schuckert.

Der Motor Fig. 231 und 231a der E. A.-G. vorm. Schuckert & Co. leistet 15 PS bei 1000 Touren leer (Ankerdurchmesser ca. 365). Die Ankerbleche sitzen auf einem Stern; die Schleifringe sind ausserhalb der Lager angebracht, um die Lagerentfernung zu reduzieren. Ein Ende der zweiphasigen Läuferwicklung liegt an der Achse.

§ 148. Siemens & Halske.

Die Zeichnung Fig. 232 stellt den Anker eines Drehstrommotors der Firma Siemens & Halske A.-G. dar. Sie zeigt die in den beiden Ankerhälften gegeneinander versetzten, gestanzten, achsialen Ventilationslöcher, von denen aus die Luft in die radialen Luftschlitze, die fischförmige Schaufeln (zugleich Distanzstücke) enthalten, geschleudert wird. Aus der Skizze geht weiter

hervor, dass dieselben Modelle für Drehstrommotoren und -generatoren verwendet werden; es wird für den Generator der Anker durch ein entsprechendes Schenkelkreuz ersetzt. (Untere Hälfte der Zeichnung.)



Fig. 230c. Kleiner Motor von Helios.

Aus der Skizze Fig. 233, welche die Blechschnitte für den feststehenden und rotierenden Teil wiedergiebt, ist ebenfalls die Anordnung der Ventilationskanäle und -schaufeln zu entnehmen. Die Masse der Bleche sind für

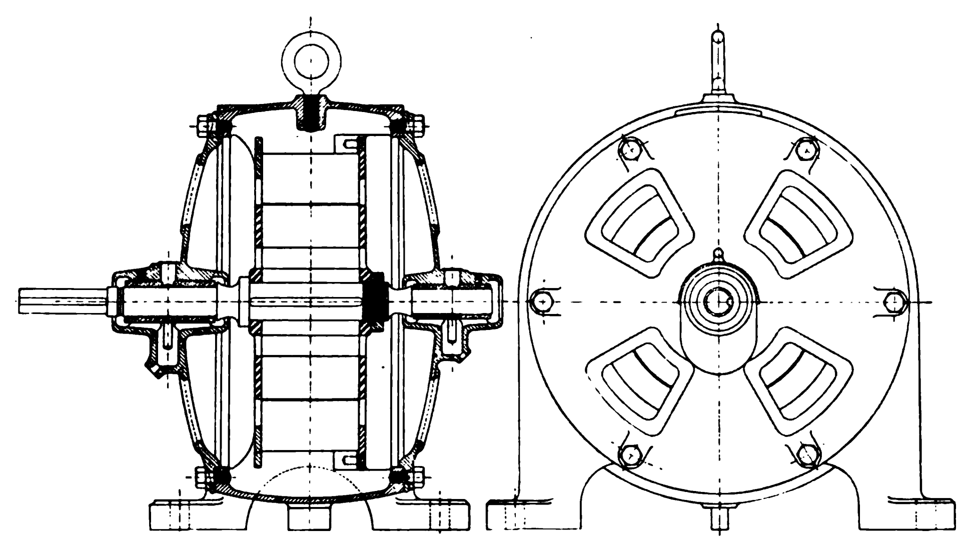


Fig. 230d. 3 PS-Motor von Helios.

das Stadium nach dem Stanzen und für dasjenige nach dem Ab- bezw. Ausdrehen angegeben.

Der durch D. R. P. 91 135 patentierte Schwungkraftregler zur selbstthätigen Bedienung der früher erwähnten Gegenschaltung von Siemens & Halske A.-G. ist in Fig. 234—236 gezeichnet.

Die arbeitenden Teile sind in der cylindrischen Trommel *T* enthalten. Die nötigen vier Zuleitungsdrähte zu den Kontaktpaaren *CD*, *CD* (Fig. 234)

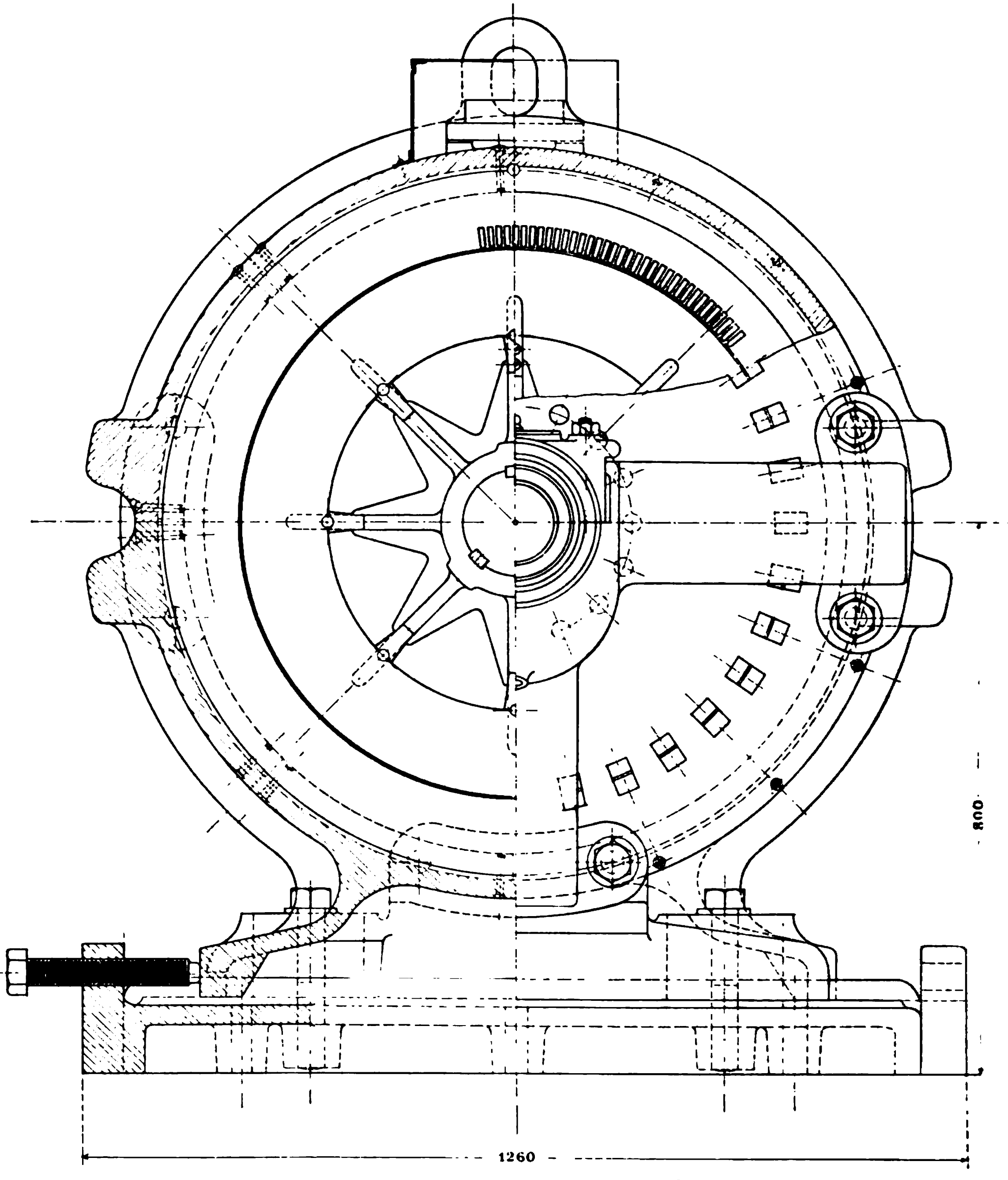



Fig. 230e. Drehstrommotor von Kummer & Co.

gehen vom Anker durch die Rückwand der Trommel, zwei davon unmittelbar zu den Kontaktklötzen *CC* (Fig. 236), die beiden entsprechenden anderen nach den Anschlussklötzen *KK*.

Von $K$ führt die biegsame Leitung $B$ nach dem Kontaktstück $D$, das isoliert auf die um $Z$ drehbare Schwungmasse $M$ aufgeschraubt ist. Da diese Masse $M$ unsymmetrisch zu dem durch $Z$ gehenden Radius ist, so giebt die

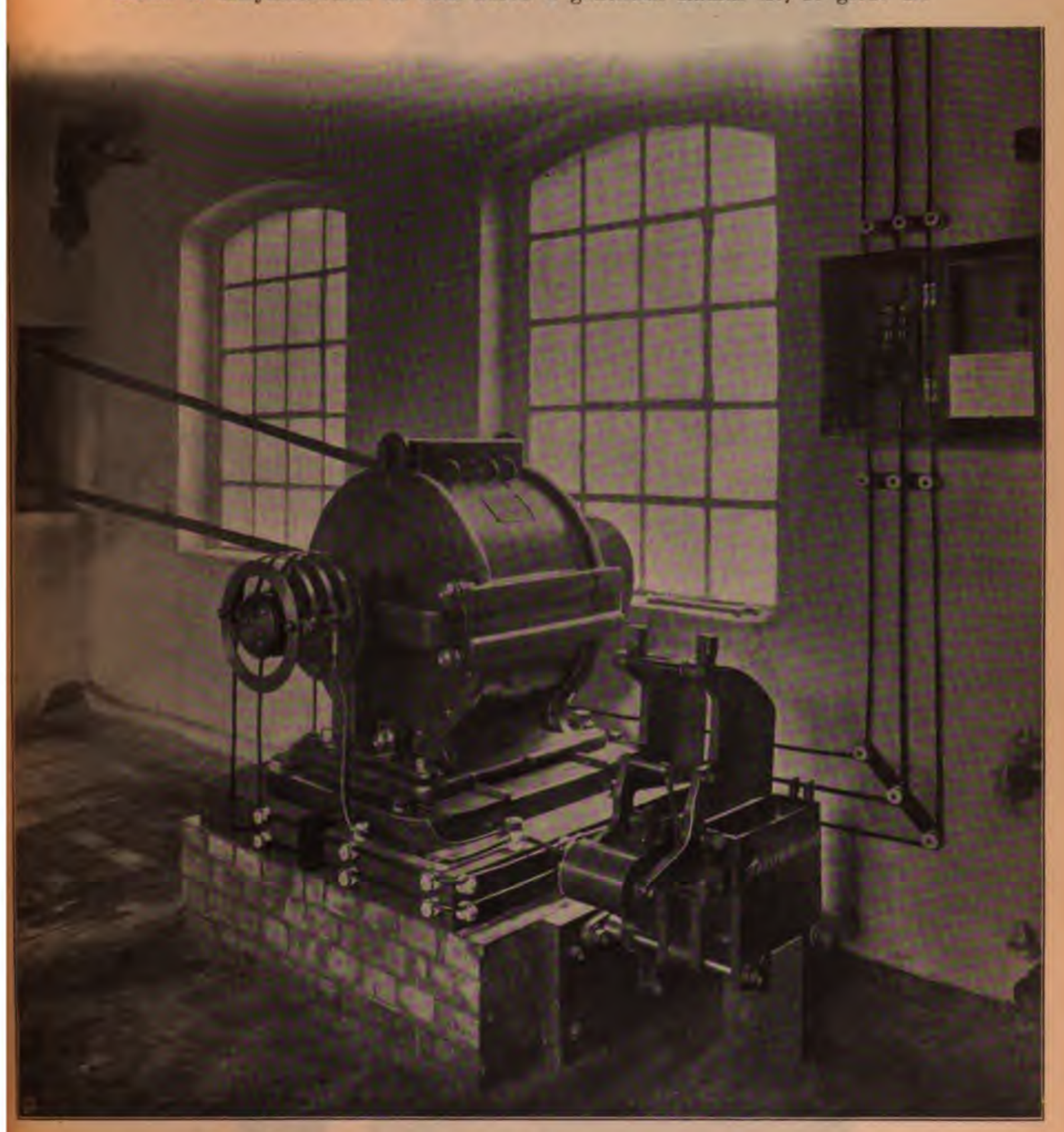


Fig. 230f. Drehstrommotor mit Flüssigkeitsanlasser von Kummer & Co.

beim Drehen des Motors entstehende Schwungkraft ein Drehmoment um $Z$. Diesem Momente wirkt das der Feder $F$ entgegen, die durch Vermittelung der Schiene $P$ mit einem Ende am Stifte $S$ der Schwungmasse $M$ angreift,

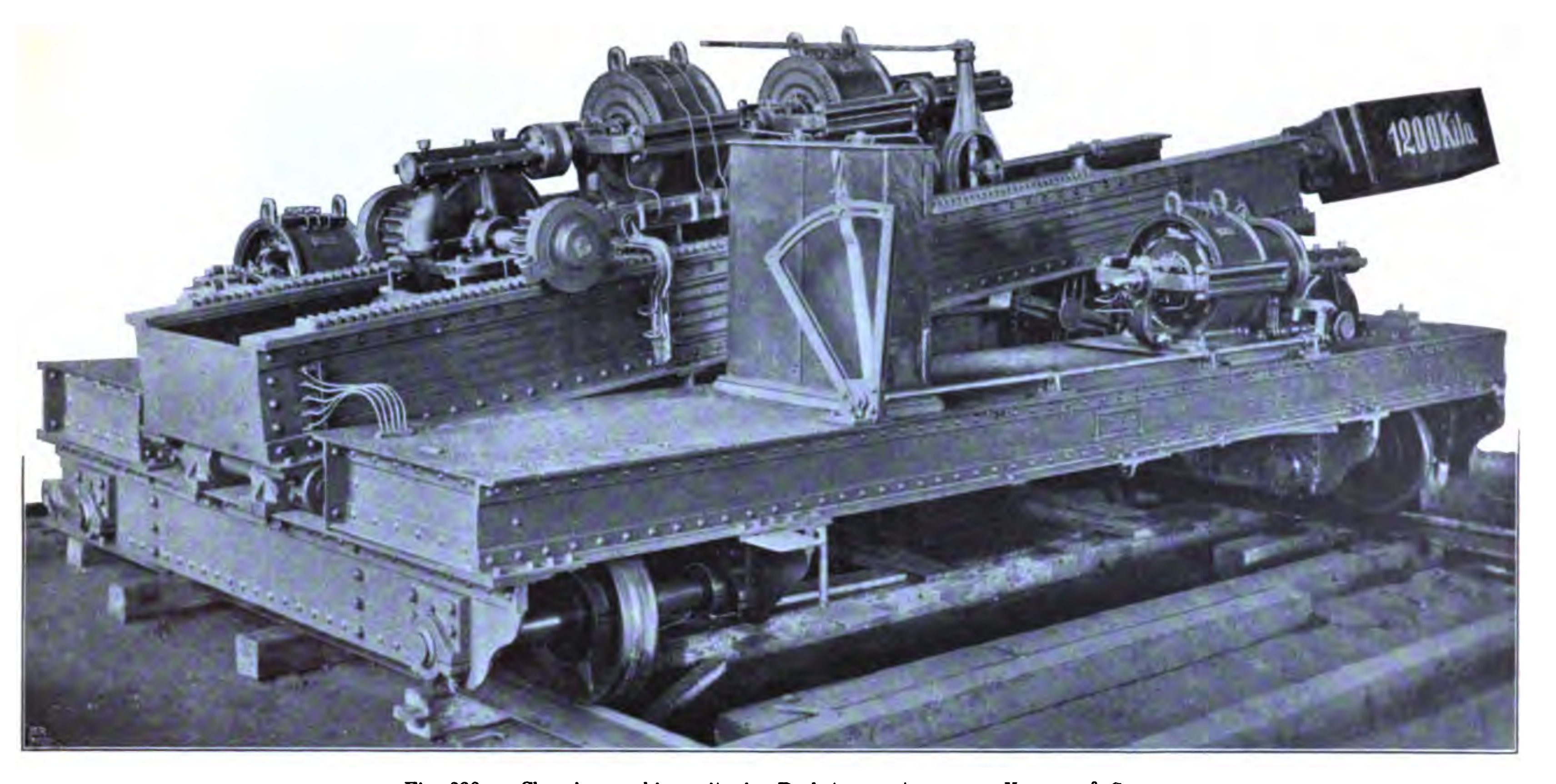



Fig. 230g. Chargiermaschine mit vier Drehstrommotoren von Kummer & Co.

mit dem anderen durch die Stellschraube $H$ an der Trommel befestigt ist. Die Schiene $P$ dient zum Geradhalten der Feder entgegen der auf ihre Durchbiegung wirkenden Schwungkraft.

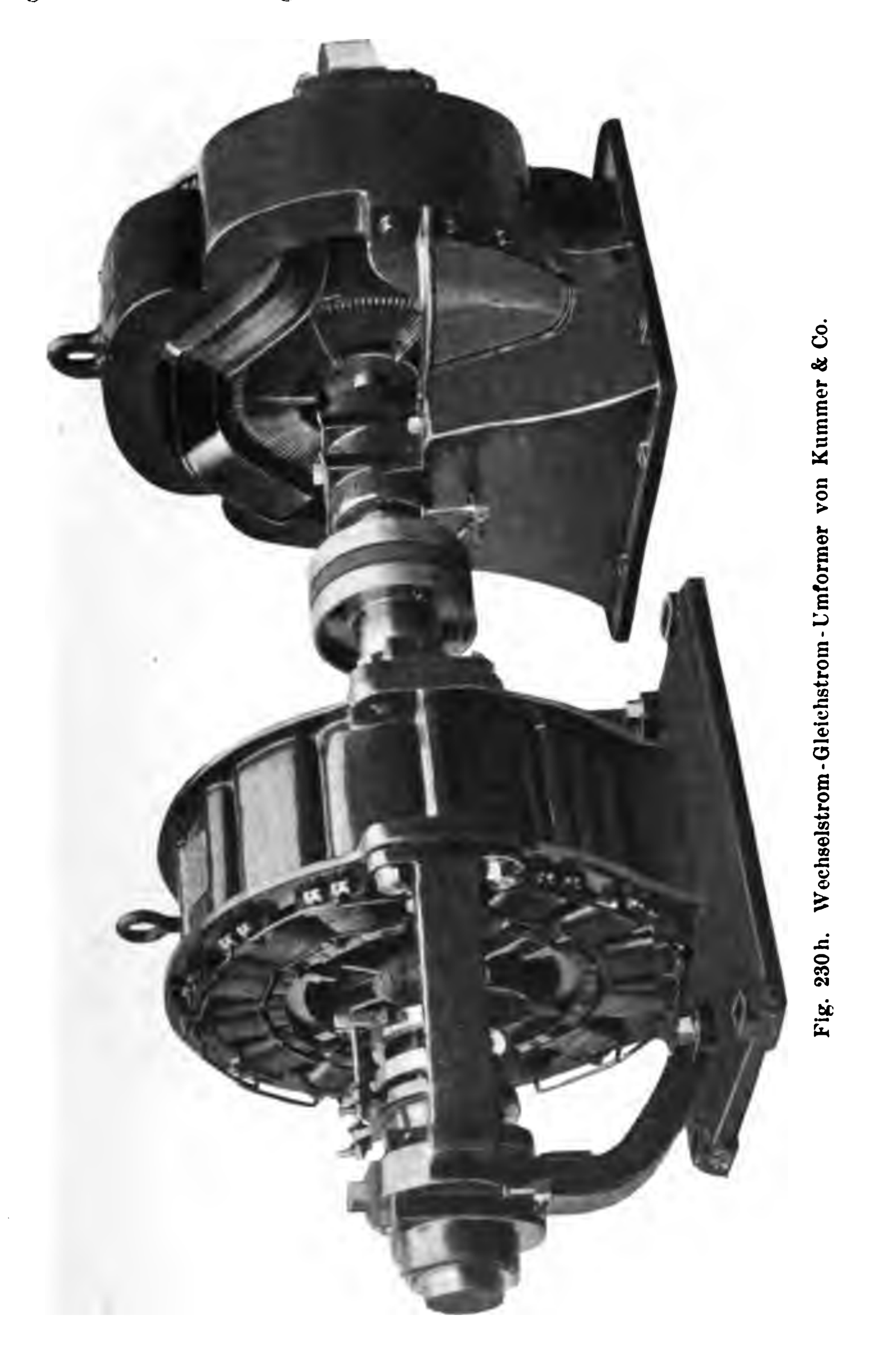


Fig. 230 h. Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer von Kummer & Co.

Der Federzug ist so bemessen, dass sein Moment dem Momente der Schwungmasse bis zu der Geschwindigkeit das Gleichgewicht hält, bei der das Schliessen der Kontakte erfolgen soll. Beim Überschreiten dieser Geschwindigkeit wird also die Schwungmasse $M$ die Anfangslage verlassen. Da

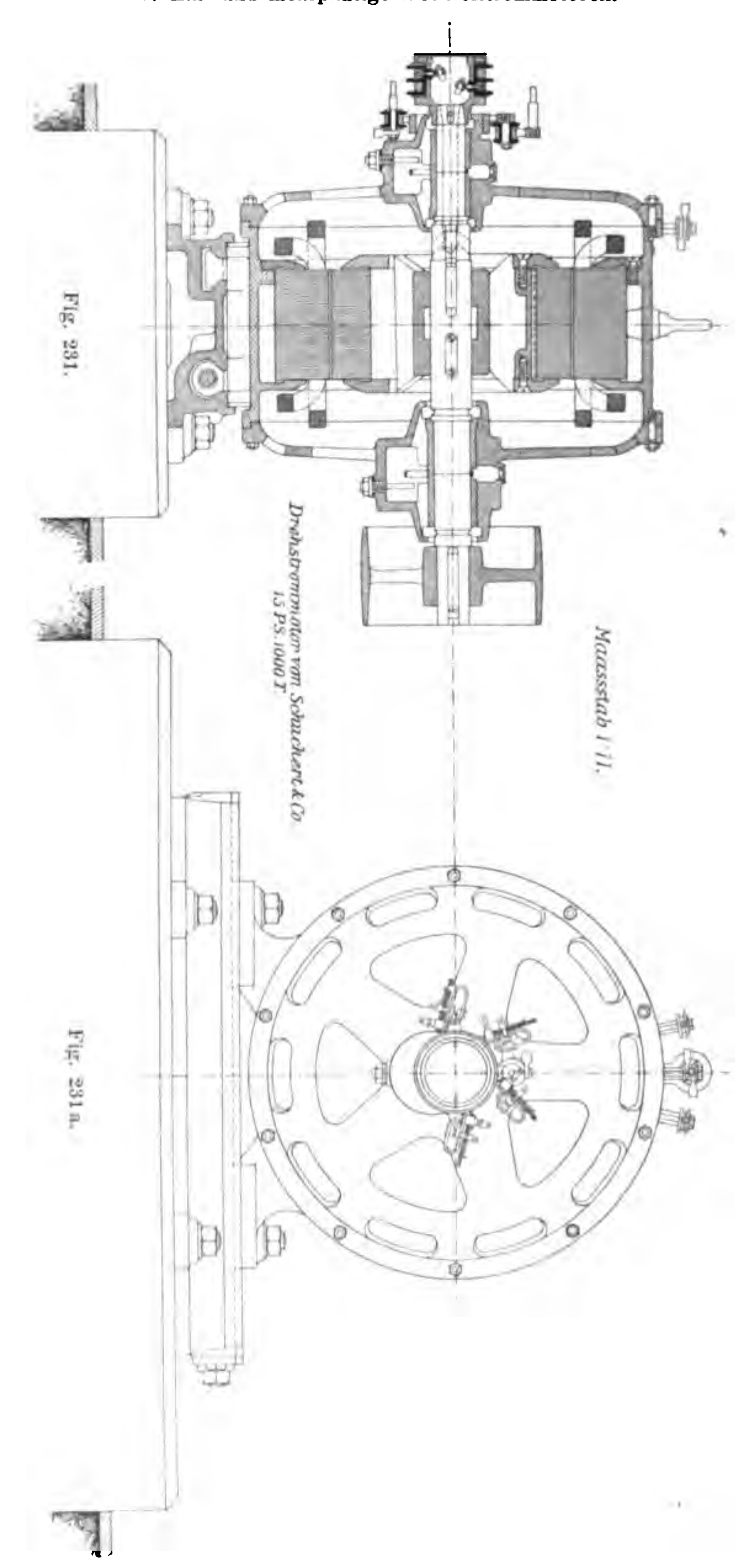
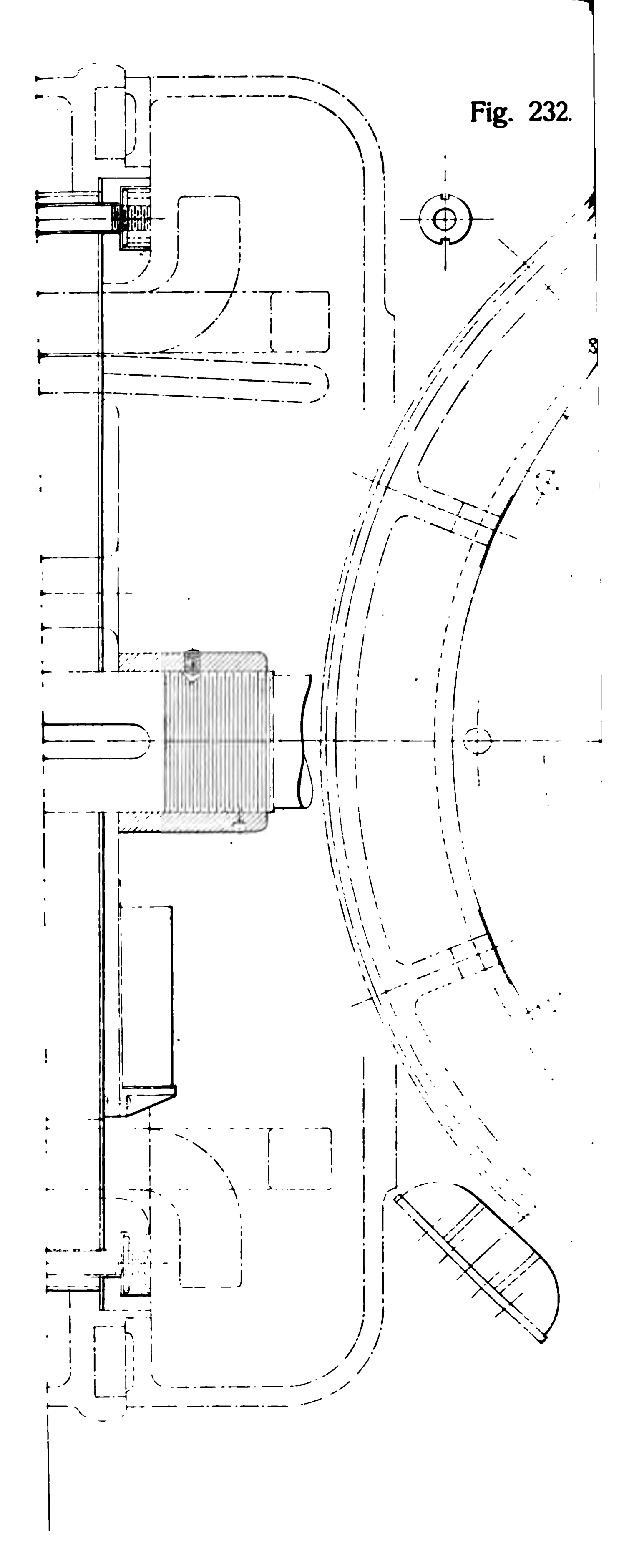



Fig. 231.

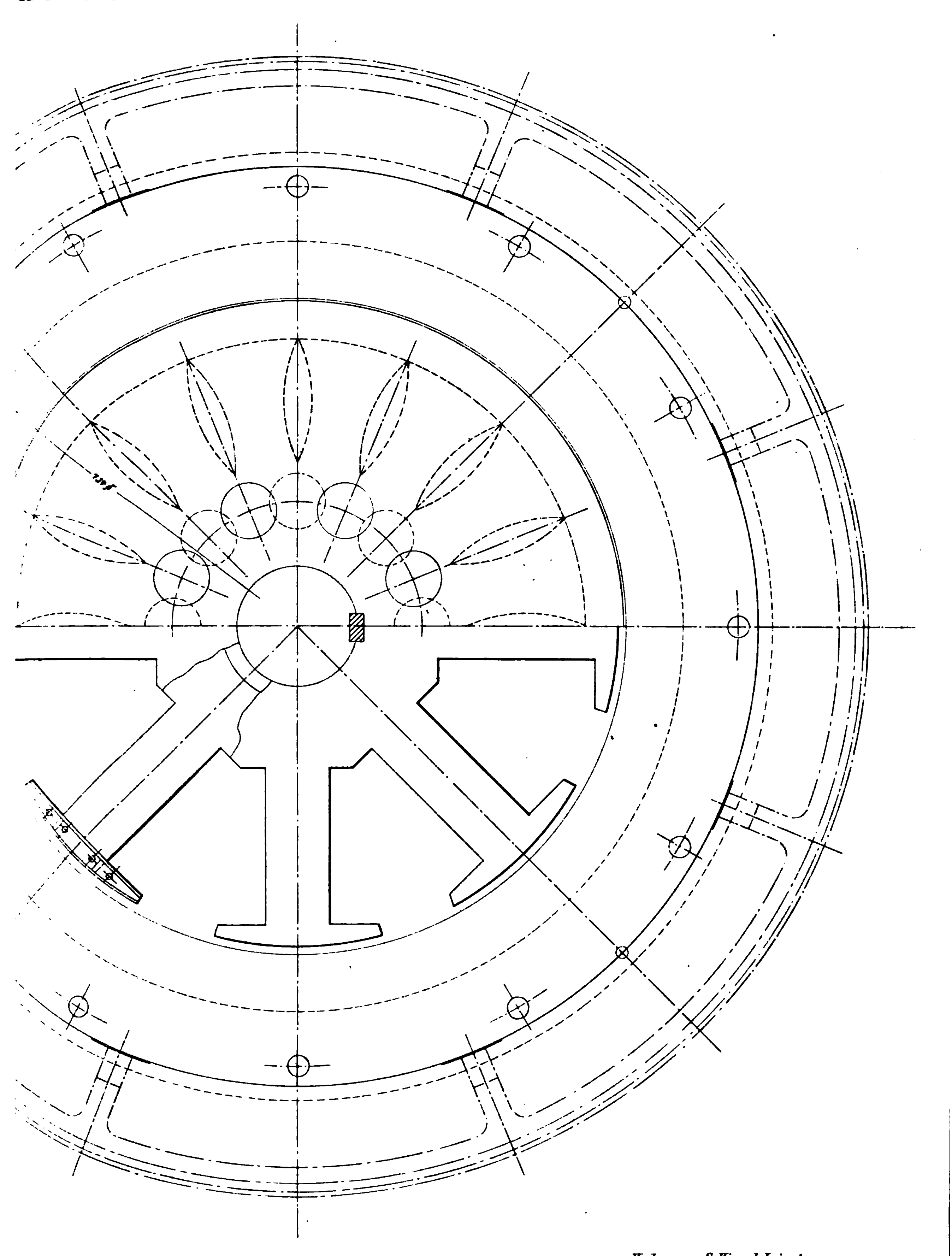
Fig. 231 a.

Drehstrommotor von Schuckert & Co 15 PS. 1000 T.

Drehstrommotor von Siem



**& Halske.**



*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

nun die Dehnbarkeit der Feder durch eine genügende Anzahl Windungen so bestimmt ist, dass das Federmoment langsamer wächst als die proportional mit dem Schwungradius steigende Schwungkraft der Masse *M*, so wird diese nach Verlassen der Anfangslage mit wachsender Beschleunigung nach der Endlage gehen, d. h. den Kontakt plötzlich und mit Überschuss an Energie schliessen.

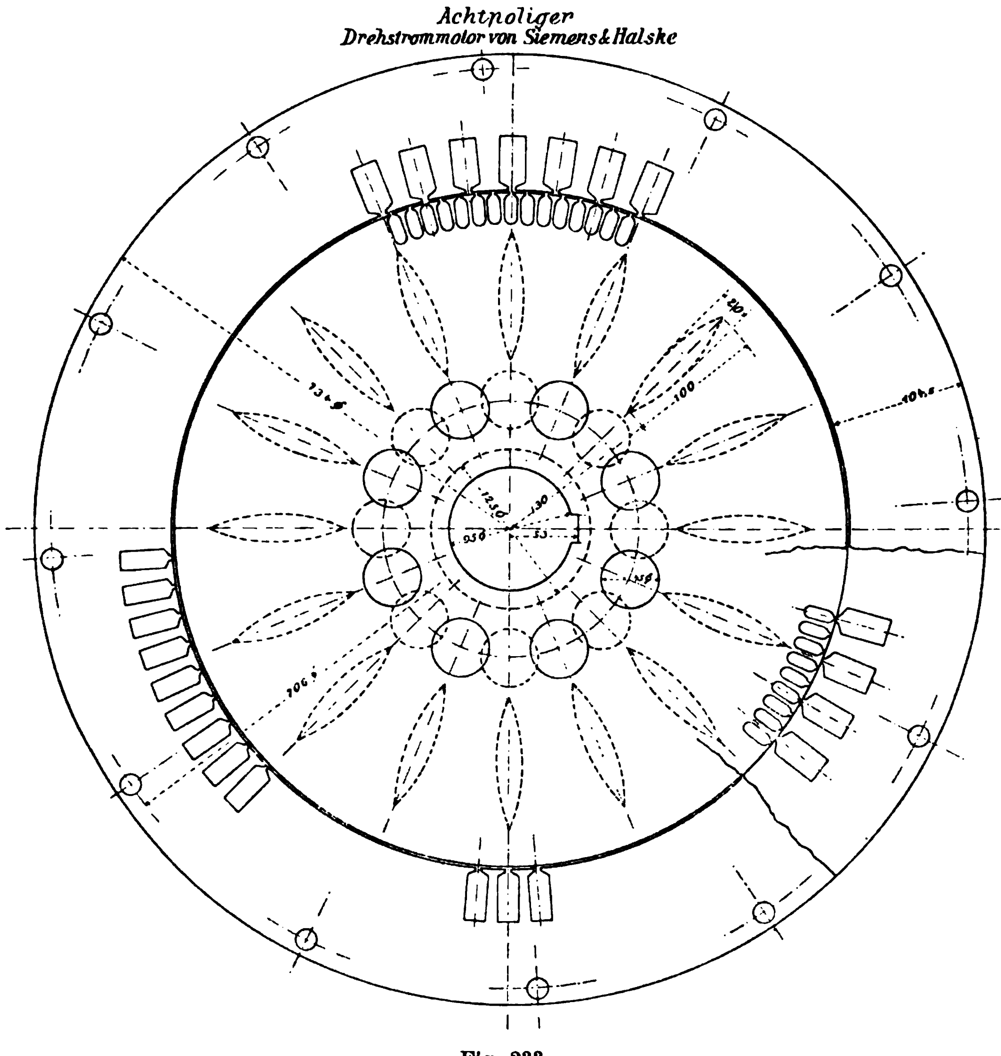



Fig. 233.

Die beiden Kontakte sollten sich gleichzeitig schliessen. Das würde auch bei genauer Einstellung der beiden Federn wegen kleiner ungleicher Veränderungen der Reibungsverhältnisse u. s. w. im allgemeinen nicht geschehen, wenn die beiden Kontaktsysteme ganz unabhängig von einander wären. Andererseits müssen die Kontaktpaare unabhängig von einander an den Endlagen zur Anlage kommen, um einen sicheren Schluss zu geben. Zur Erreichung beider Zwecke dient die um die Nabe der Trommel drehbare Scheibe *W* mit den radialen Schlitzen *R R*, durch die mit Spielraum die

an den Schwungmassen *MM* festen Stifte *ss* gehen. Verlässt nun die eine Schwungmasse die Anfangslage früher als die andere, so wird sie nach Durchlaufen des Spielraumes der Schlitze *RR* die zweite Schwungmasse mitnehmen, und da sie inzwischen schon Überschuss an Energie gewonnen hat, so werden auf diese Weise ziemlich grosse Unterschiede der beiden Federspannungen für das gleichzeitige Schliessen der Kontakte unschädlich gemacht werden, während andererseits eben wegen des Spielraumes der Stifte

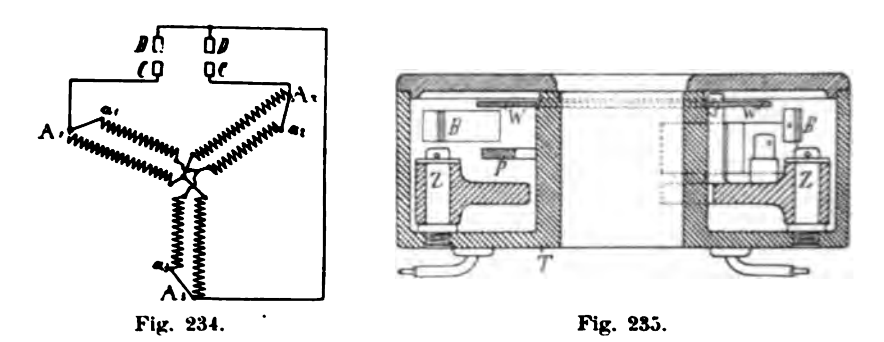



Fig. 234. Fig. 235.

*ss* in den Schlitzen *RR* die beiden Kontaktpaare unabhängig von einander zur Anlage kommen.

Die kleinen Motoren (Fig. 237) mit zweiteiligem Gehäuse und angebauten Anschlusskästen sind besonders für Webstuhlantriebe bestimmt. Für grosse Mo-

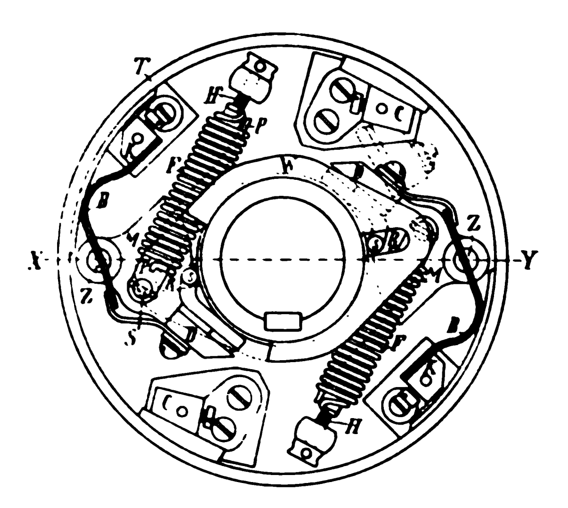



Fig. 236. Gegenschaltung von Siemens & Halske.

toren, z. B. für langsamlaufende Wasserhaltungen verwendet Siemens & Halske die Motortype Fig. 238, deren Gehäuse zur Justierung des Luftspaltes in horizontaler und vertikaler Richtung vermittelst der Schrauben *a* und *b* verstellt werden kann. Die Blechbefestigung der Statorbleche (Fig. 239) ist der Firma patentiert. Es wird der Ring *a* zwischen drei oder mehr gleich weit von einander abstehenden Gruppen von radial gestellten, durch das äussere Gehäuse geschraubten Druckschrauben *d* festgeklemmt, welche den Blechkörper entweder direkt oder unter Vermittelung von in Nuten eingelegten Federn

halten, zum Zweck, eine genaue Centrierung des Ringes zu ermöglichen. Die Wicklung wird vor dem Einbau in das Gehäuse ausgeführt.

§ 149. Union.

Der Ankerwiderstand des Motors Fig. 240 der Union E.-G. ist in den Anker eingebaut und wird vermittelst Handhebels kurzgeschlossen. Der

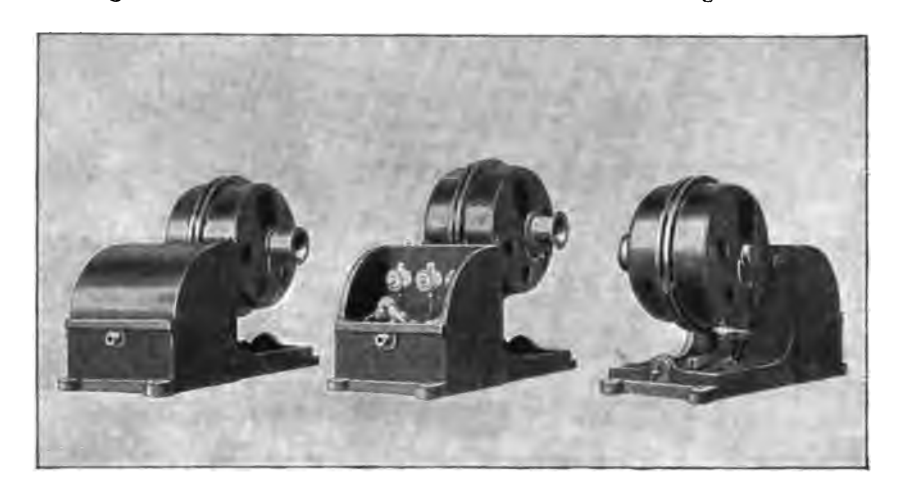


Fig. 237. Webstuhlmotoren von Siemens & Halske.

Motor $J\,8$ — 40 — 750 Fig. 241 leistet bei 750 Touren (achtpolig) 40 PS. Die Schleifringe liegen ausserhalb des Lagerschildes. Die Konstruktionszeichnung des fünfpferdigen Motors ist in Fig. 242ff. dargestellt. Stator und Rotor sind schablonengewickelt. Der Motor ist sehr geschützt gebaut.

Drehstrommotoren von Siemens & Halske.

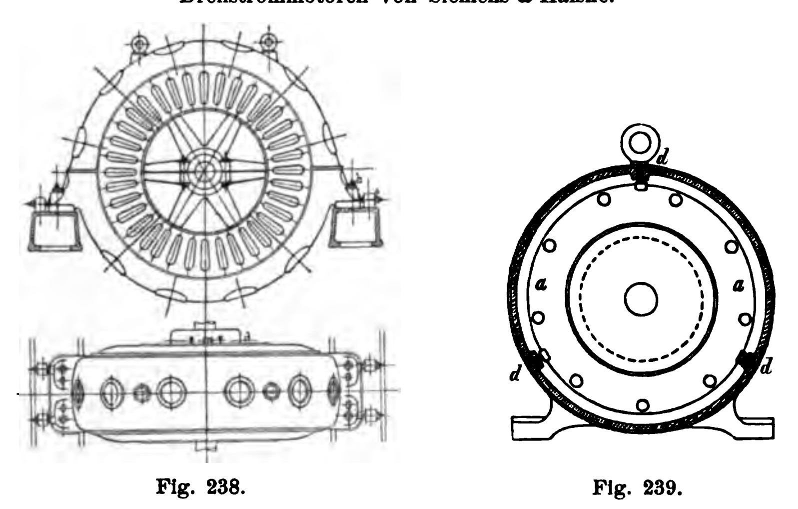



Fig. 238. Fig. 239.

Der Anlassstrom wird dem Rotor pro Schleifring durch je zwei Kohlenklotzbürsten abgenommen.

§ 150. Ganz & Co.

Der Motor[1]) Fig. 243 von Ganz & Co. ist im Ständer für Ringwicklung eingerichtet. Der innere Teil dieser Wicklung liegt in Nuten,

1) Nach Z. V. D. I. 1897 v. Hoor.

der äussere frei, nur in gewissen Abständen durch die Rippen *r* gehalten. Die Ständerwicklung wird ausserhalb des Gestelles ausgeführt; der Körper *pmr* wird erst dann in das Gehäuse *S* eingeschoben. Die Stäbe des Kurz-



Fig. 240.

schlussankers sind durch Gabeln *g* verbunden, die durch einen gezahnten Isolationsring *f* gegen die Centrifugalkraft geschützt sind. — Neuere Motoren

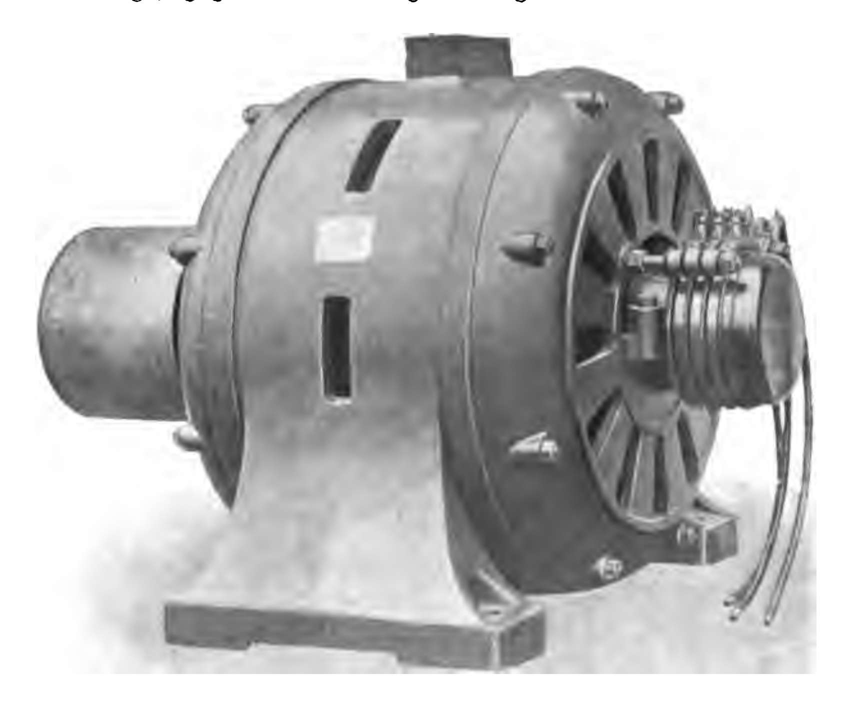


Fig. 241.

von GANZ & Co. sind so gebaut, dass der rotierende Teil mit Ringwicklung über Schleifringe am Netz liegt. Der äussere feststehende Teil mit Trommelwicklung ist beim Anlauf auf Widerstand geschlossen. Der Dreiphasenmotor

Fig. 243a und 243b von GANZ & Co. leistet bei 300 Volt Betriebsspannung 750 PS und macht bei 43 Perioden 250 Touren, d. h. er ist 20polig. Rotor und Stator haben Trommel-Stabwicklung mit 210 runden Stäben von 14 mm Durchmesser, pro Nute ein Stab, Dreieckschaltung. Die Verbindungsgabeln

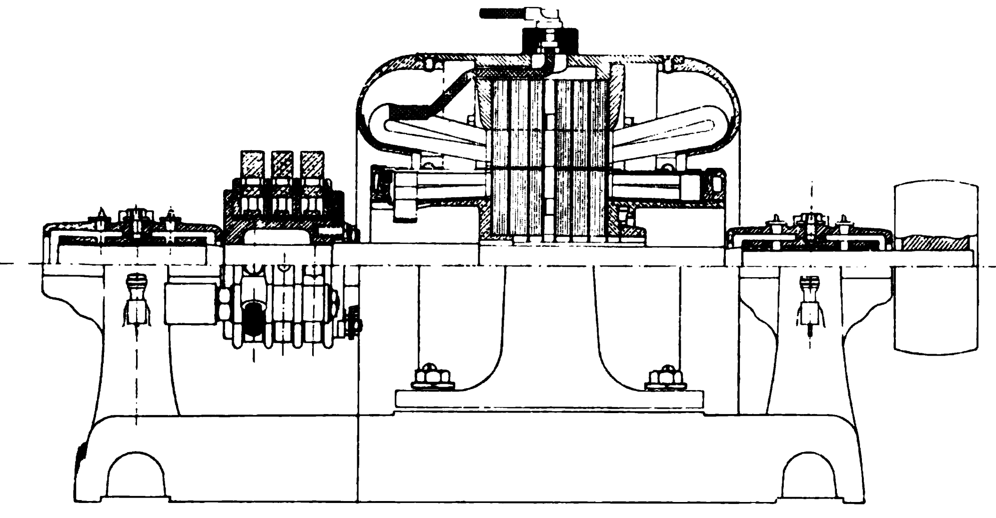


Fig. 242.

haben im Stator den Querschnitt 10 × 20 mm, im Rotor 10 × 15. Die Stäbe sind durch 2 mm Micanitrohre isoliert. Die Bohrung beträgt 1848 mm, die Luft ca. 2 mm. Stator und Rotor werden von vier je in einer Ebene liegen-

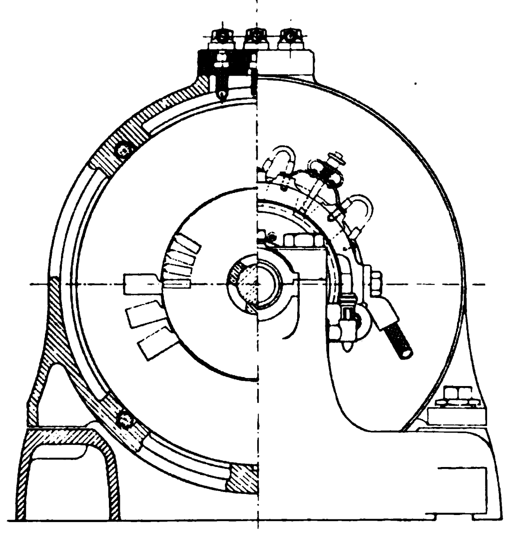


Fig. 242a.

den Lüftungskanälen durchsetzt. Die aktiven Eisenbleche werden durch Ringe zusammengepresst, deren Halt durch eine ringförmige, mit Metall ausgegossene Nute gegeben ist. Die Befestigung der Schleifringe ist einfach und bequem; der mittlere Ring ist direkt mit der Ankerachse verbunden.

Der Ankerstrom wird durch 2 × 7 Kohlenbürsten nach aussen geführt. Interessant ist die Ausbildung der sechsarmigen Lagerschilder und zwar sowohl die durch radiale Schrauben erfolgte Aufhängung des Gestelles als auch die Konstruktion der Lagerfüsse. Die Lagerschalen sind kugelig ge-

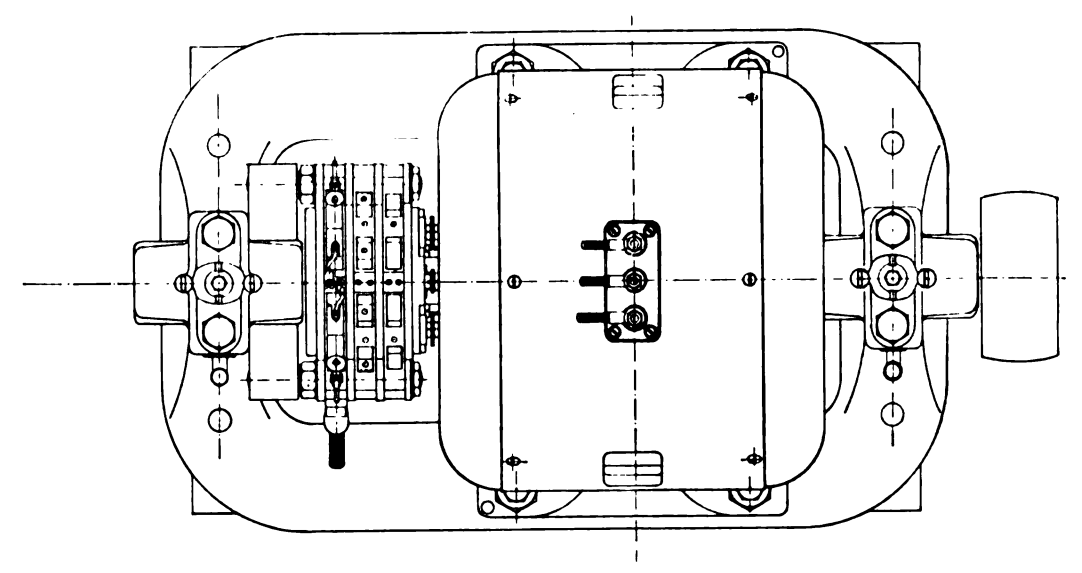


Fig. 242b.

lagert; es sind zwei Schmierringe vorgesehen; Lagerlänge : -durchmesser beträgt etwa 3,5. Das Schaltungsschema (Fig. 244) gilt für Einphasenmotoren I, II, III . . ., wobei I durch eine Hilfswicklung und eine Anlassvorrichtung

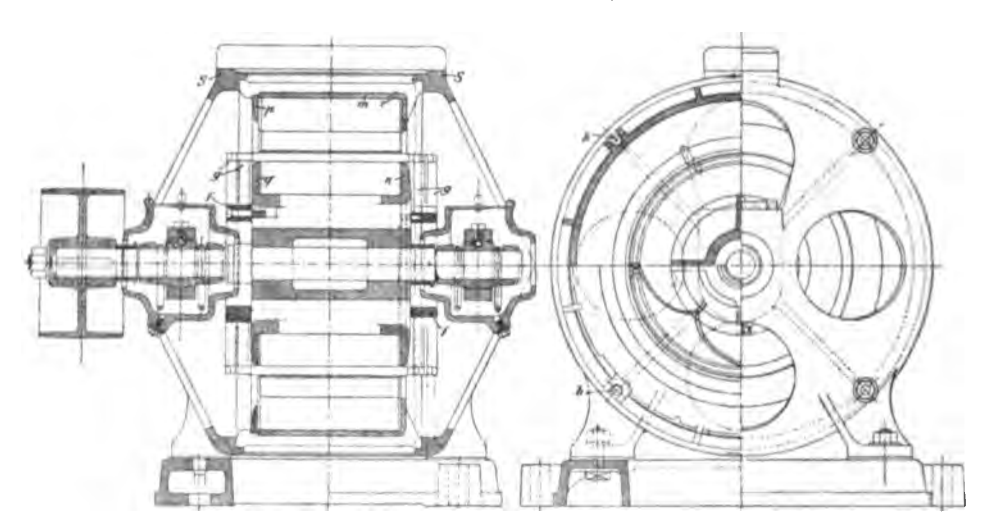
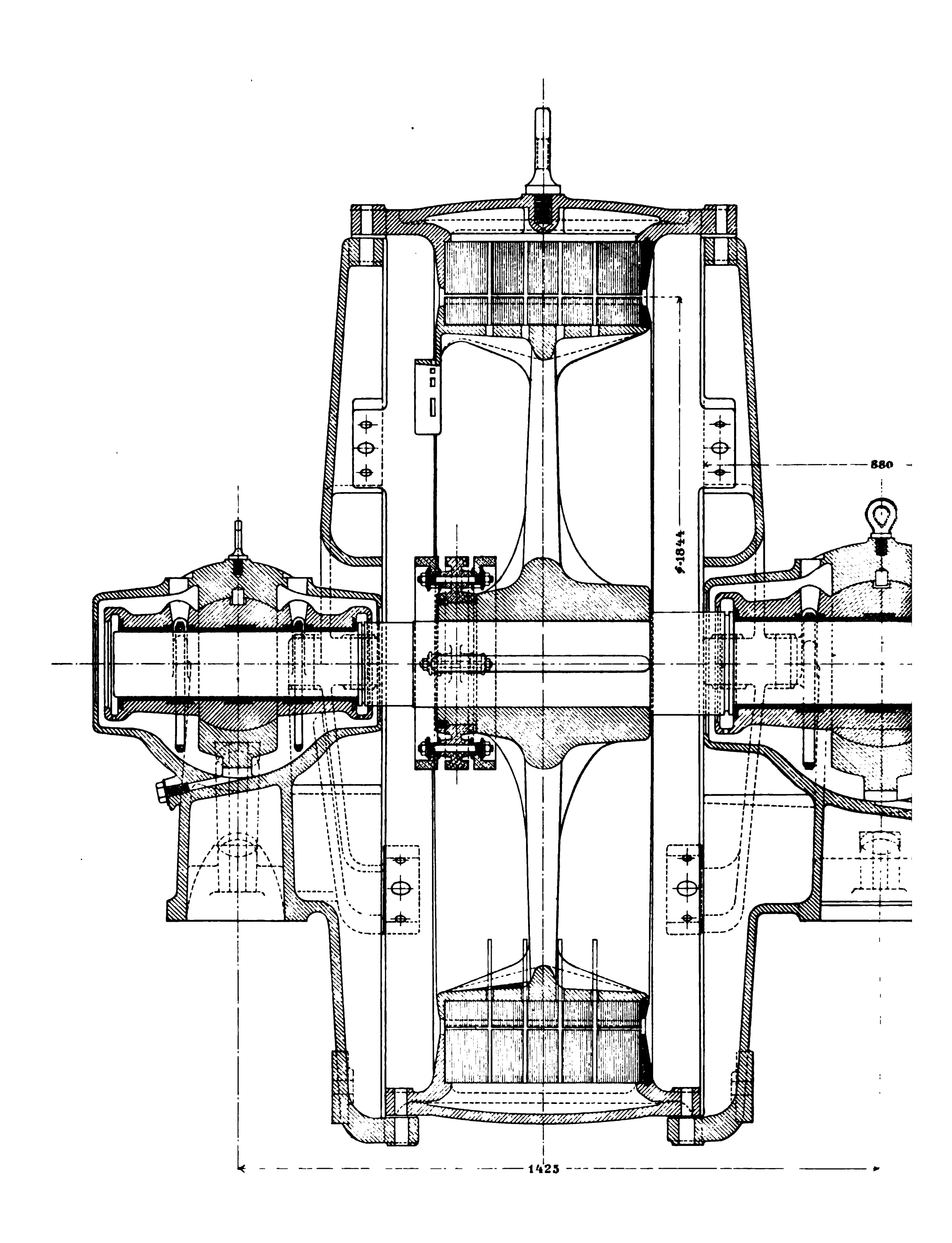


Fig. 243.

(Widerstand und Selbstinduktion) in Betrieb gesetzt wird, während II und III von dem bereits arbeitenden Motor I phasenverschobene Ströme bekommen. II und III brauchen also keine besondere Anlassvorrichtung. Die Leitung $L_2$ ist ein Mittelleiter. Ein Einphasenmotor mit der früher be-



880
φ·1844
1425

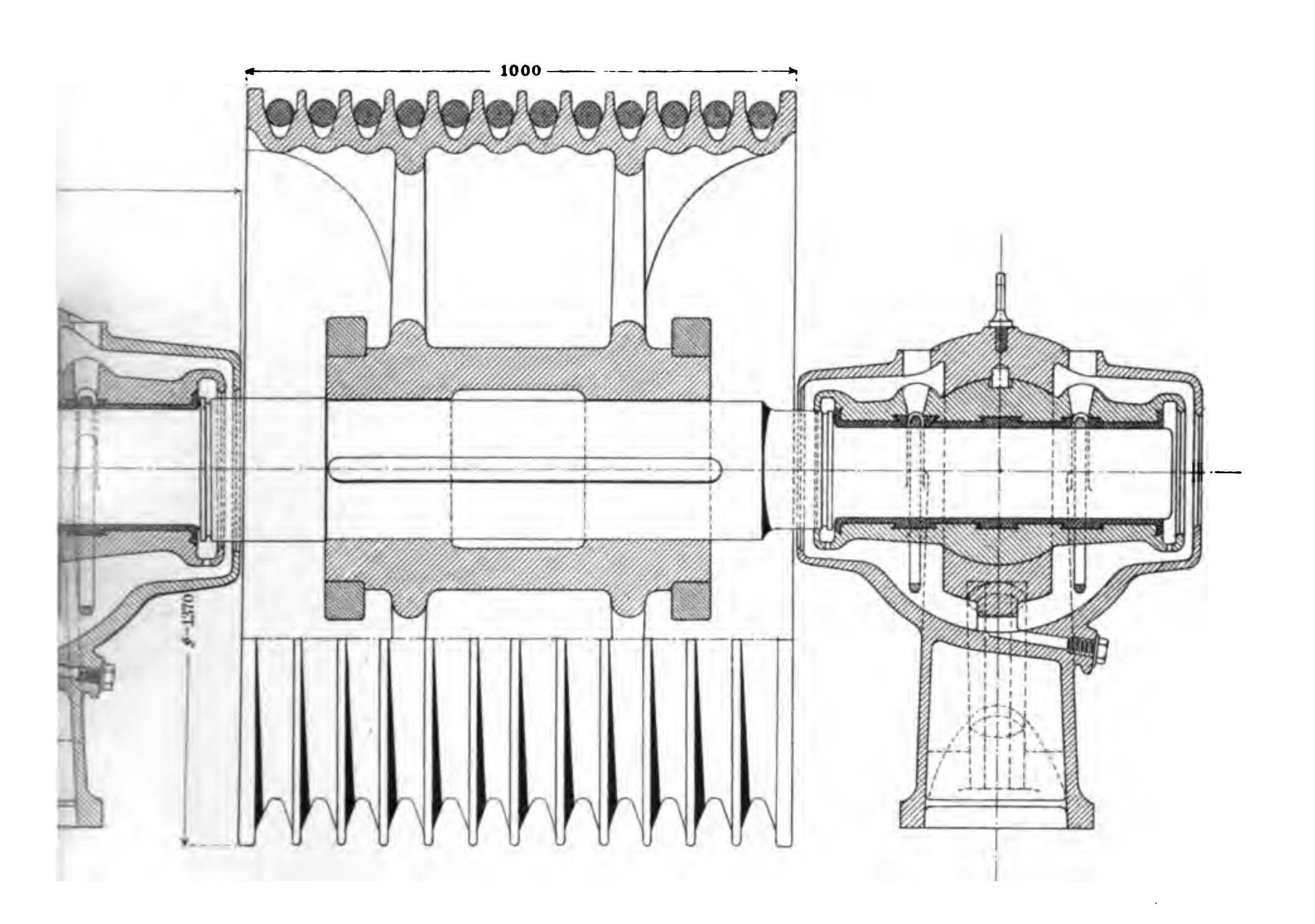



Fig. 243 a.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

handelten Polumschaltung von Déri für Anlasszwecke ist in Fig. 245 nach L'Industrie El. 10. Oktober 1900 wiedergegeben. Der skizzierte Motor läuft sechspolig an, wobei der Anker über den Kollektor und die Bürsten kurzgeschlossen ist; bei einer bestimmten Tourenzahl wird er automatisch

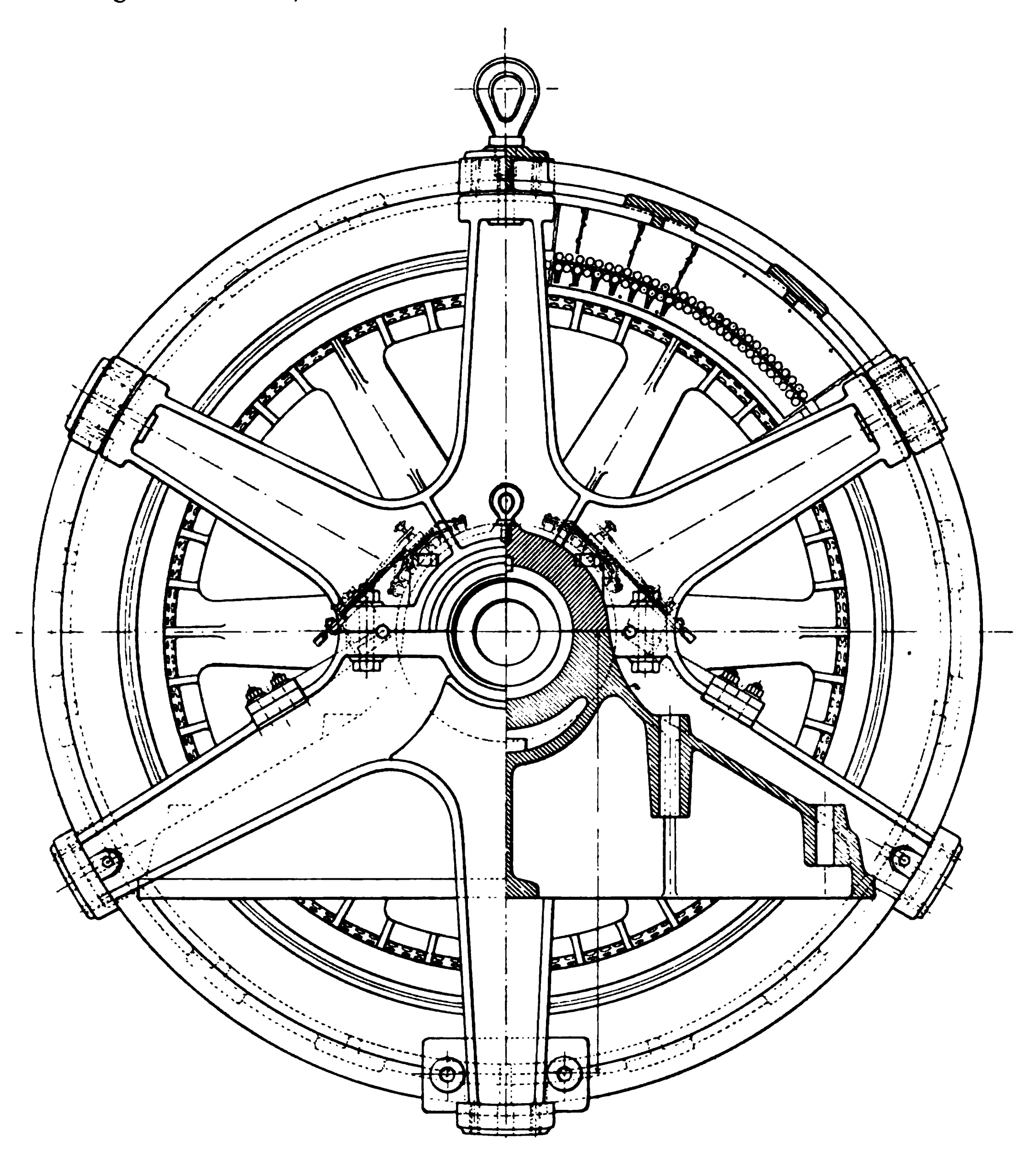


Fig. 243 b. Drehstrommotor von Ganz & Co.

auf acht Pole geschaltet und läuft als asynchroner Motor mit kurzgeschlossenem Drehstromanker.

§ 151. Kolben.

Die Ausführung der kleineren Drehstrommotoren der E. A.-G. vorm. Kolben & Co. geht aus dem Zusammenbau der Kranwinde (Fig. 246) hervor. Die Schleifringe mit Kohlenbürsten liegen ausserhalb der Lagerschilder. Die

Lager des grösseren Motors sind zweiteilig. Die Löcher der Lagerschilder des kleineren Motors sind durch Klappen verschlossen. Die Übertragung

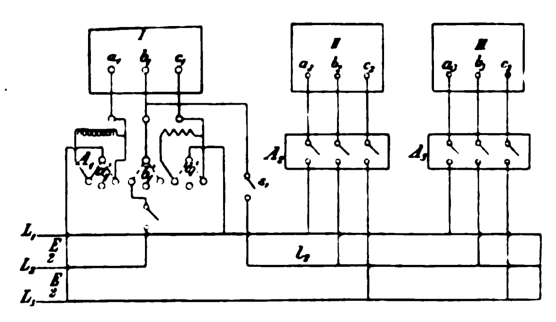


Fig. 244.

nach dem Windwerk erfolgt durch Schraubenkupplung und Schneckenübersetzung. Für die Hub- und Senkbewegung ist eine Bandbremse mit Solenoid-Bremsmagnet vorgesehen. Ein vierpferdiger Drehstrommotor von KOLBEN ist

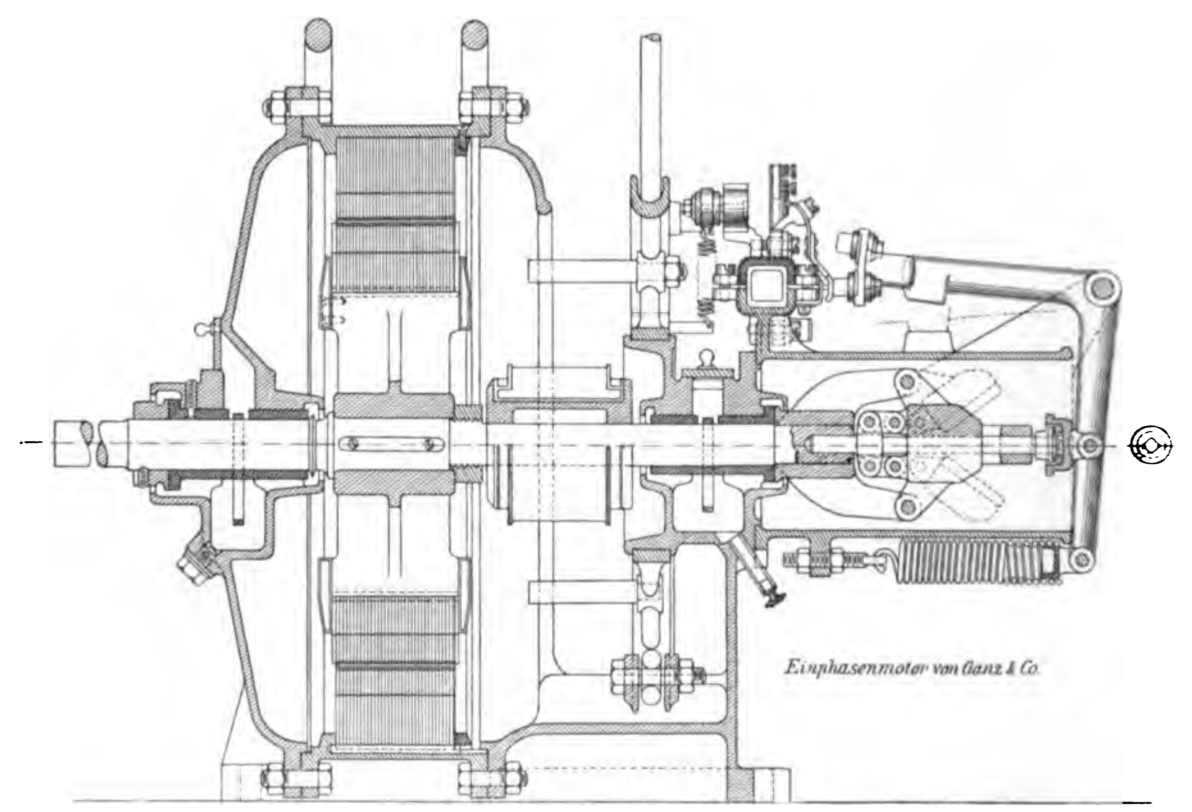
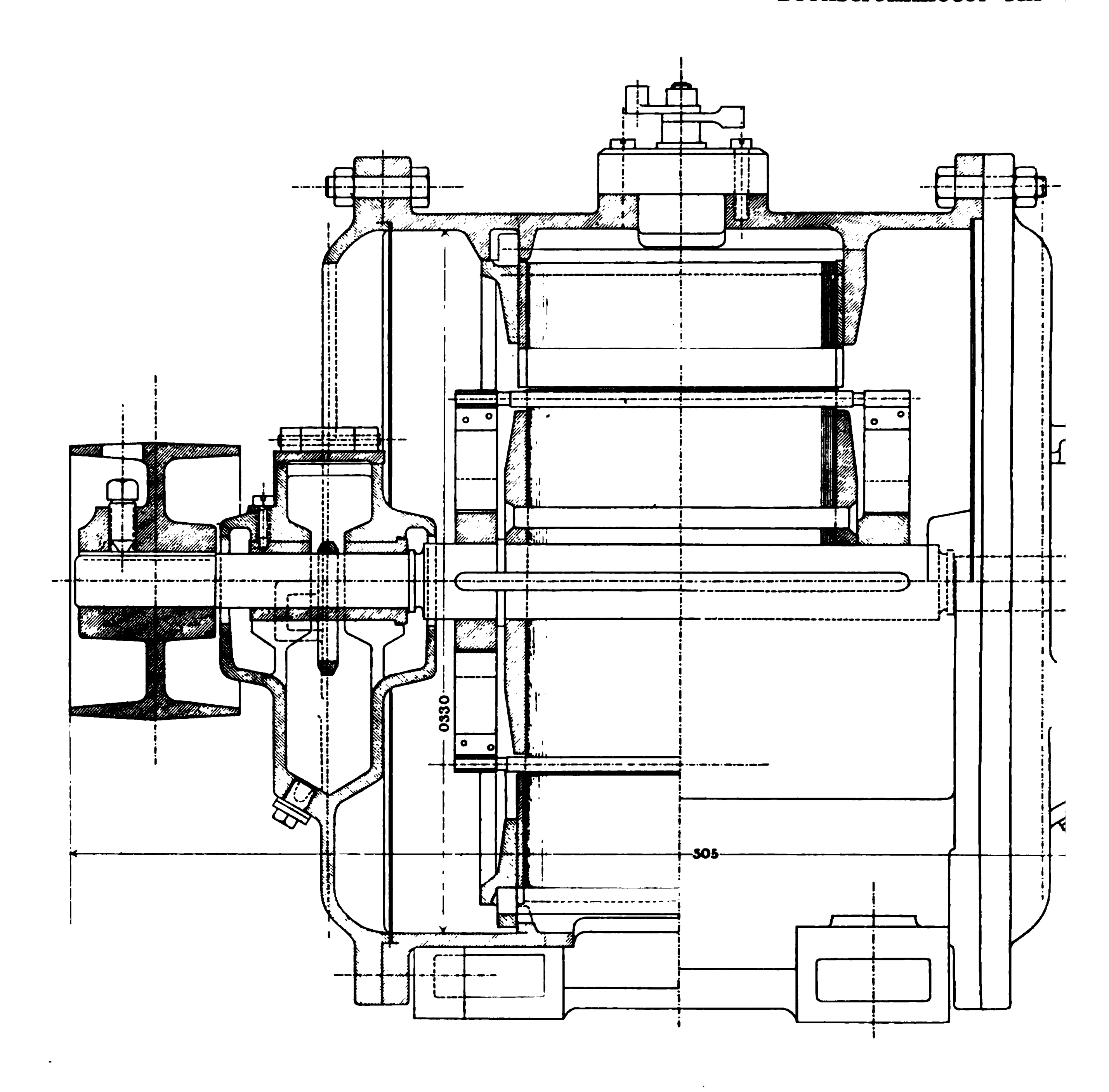


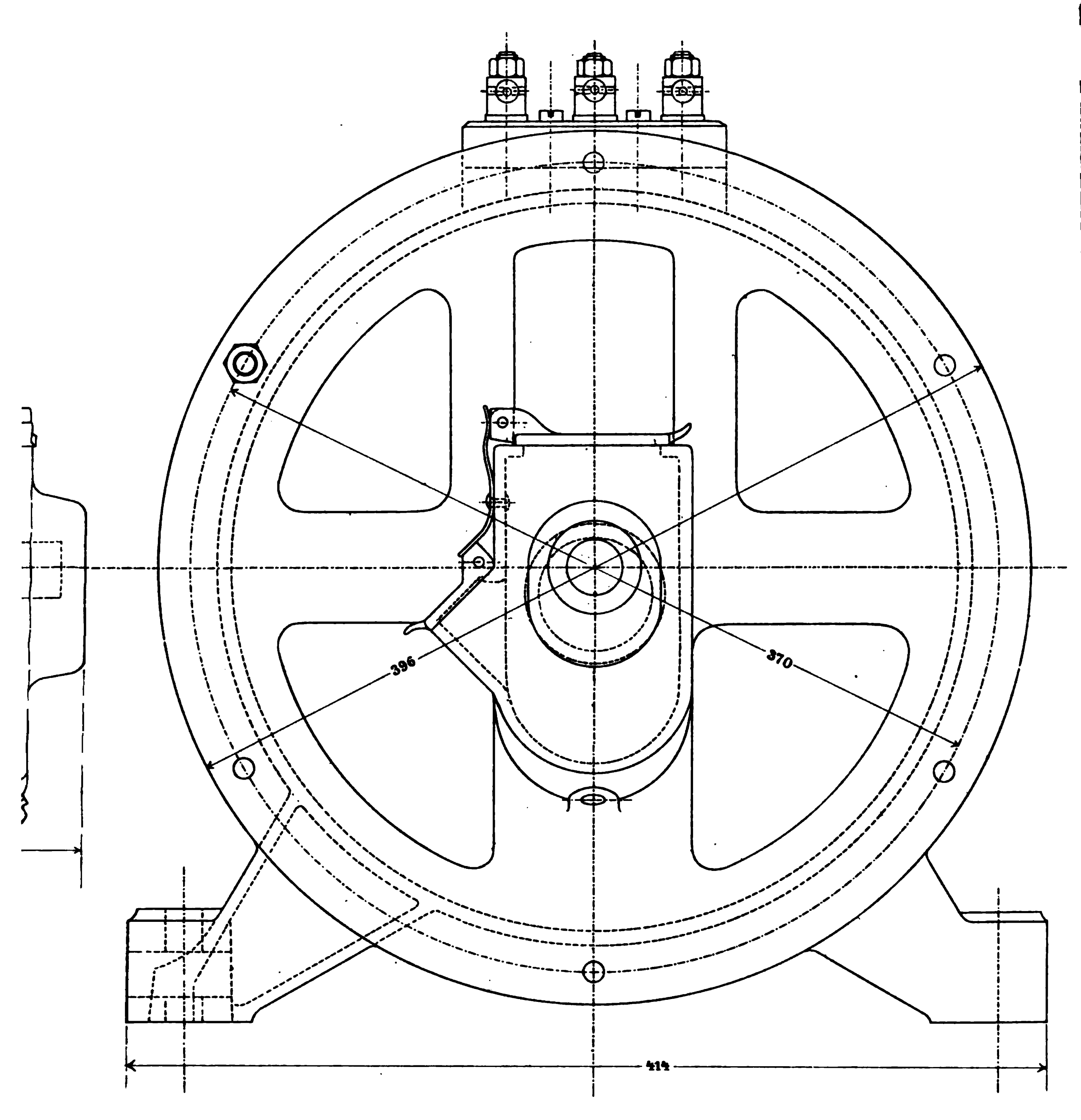

Fig. 245.

in Fig. 247 entworfen. Die Statorbleche sind durch Keile, die in der Achsenrichtung liegen, und durch Pressringe, die in Richtung des Umfanges laufen, in einfachster Weise gehalten. Die Rotorbleche werden direkt auf die Achse geschoben. Der Rotor trägt Kurzschlusswicklung; die Stäbe sind durch

**Drehstrommotor für** ...



**PS. von Kolben & Co.**




247.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

radiale Stücke mit den Ringen von kleinem Durchmesser verbunden. Die Lager sind mit Messingschalen ausgebüchst. Man beachte die Ausbildung der Ölbehälterklappen.. Der Motor (Fig. 248) leistet bei 1000 Touren 20 PS: Stator und Rotor sind drahtgewickelt, die Bleche sind aussen und innen mittelst durchgehender Schrauben zusammengepresst. Die Köpfe und Muttern sind überkappt. Die Lager sind kugelig ausgegossen, das Weissmetall wird hydraulisch eingepresst und die Zapfen sind glashart. Die Schleifringe liegen aussen und sind luftig und einfach gebaut. Der Motor (Fig. 249) für maximal 34 PS hat eine Ankerkurzschlussvorrichtung (Druckscheibe am Achsende) und eine Bürsteabhebvorrichtung (drei Bolzen werden

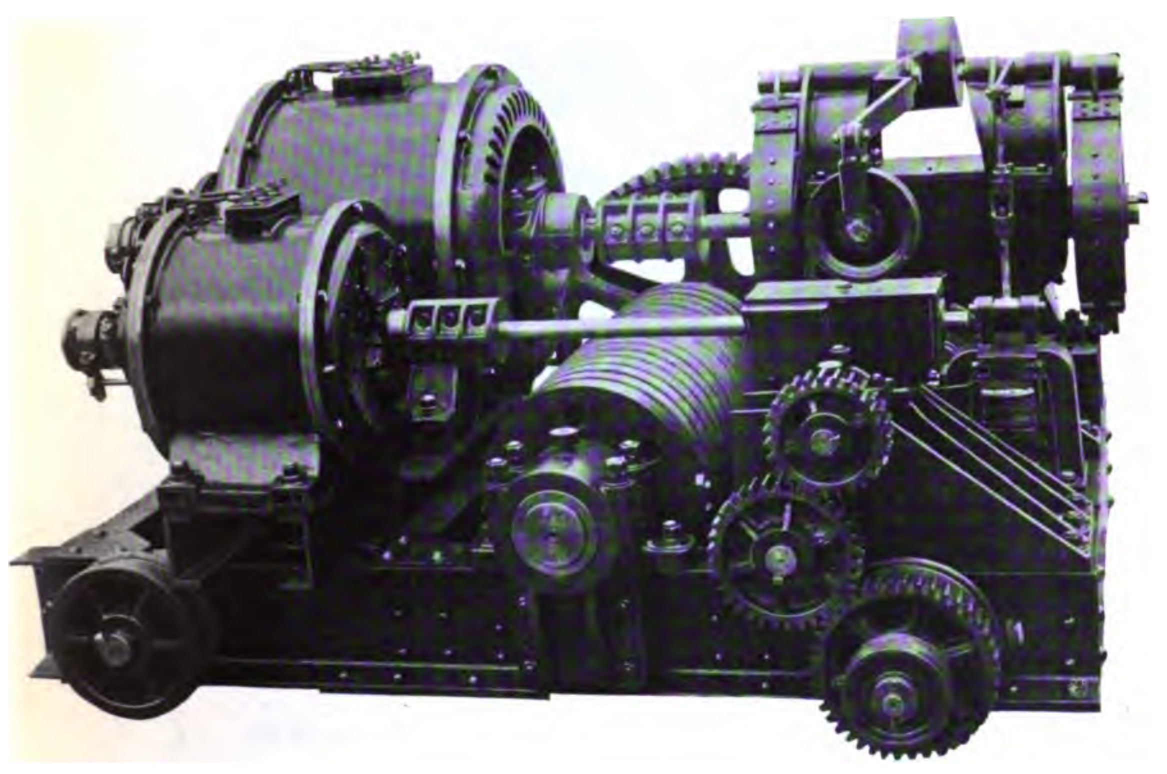


Fig. 246. Kranwinde mit Drehstrommotoren von Kolben & Co.

durch einen Handgriff in der Umfangsrichtung verschoben und heben die Kupferbürsten).

Mit den gleichen Einrichtungen ist der Motor (Fig. 250) für 120 PS zum Antrieb eines Ventilators ausgerüstet. Bei diesem und den anderen Modellen ist die solide und geschmackvolle Ausführung der dreiarmigen Lagerschilder beachtenswert. Der grosse Motor Fig. 250 sitzt auf einer Grundplatte und hat noch ein besonderes Stehlager. Für Einphasenmotoren verwendet Kolben die hübsch kombinierte Anlassvorrichtung (Fig. 251): Induktionsfreier Widerstand, der justierbar ist, mit angebautem Umschalter. Der Synchronmotor (Fig. 252) für 3000 Volt Drehstrom, 240 Touren, 48 Perioden betreibt einen Bahngenerator von 450 KW. Der Motor (Innenpoltype) hat lamelliert eingegossene Polschuhe (Fig. 252a) und eine Nut pro Pol und Phase mit ein-

gelegten Spulen. Das Aggregat sitzt auf gemeinsamer Grundplatte mit drei Lagern. Die Erregermaschine ist auf einem Konsol des Aussenlagers aufgestellt.

Ein anderes kleineres Umformeraggregat aus Synchronmotor und Gleichstromdynamo bestehend zeigt Fig. 253—255. Der Durchschnitt des Synchronmotors (Induktortype) ist schon in Band IV, Fig. 526 gegeben, während die Gleichstromseite in Fig. 255 gezeichnet ist. Die Inbetriebsetzung erfolgt durch einen kleinen versenkten Asynchronmotor, der auf einer federnden Wippe sitzt und mittelst Riemen auf die als Riemenscheibe ausgebildete Kupplung der beiden Maschinen arbeitet. Nach dem Anlauf wird der Riemen auf eine Leerscheibe verschoben.



Fig. 249. Drehstrommotor von Kolben & Co. Type 14—34 PS.

§ 152. Alioth. Der folgende Einphasenmotor Fig. 256 und 257 von der E.-G. Alioth (Z. V. D. J. 1896, p. [illegible]) hat durchbrochene Riemenscheibe mit Schwungrad, im Stator 24 Nuten, im Rotor 22 vom Durchmesser 6 mm. An den grossen Motormodellen dieser Firma ist besonders die Drehbarkeit des Gehäuses bemerkenswert. Die Grundplatte ist cylindrisch ausgedreht und das mit gedrehten Ansätzen versehene Gehäuse wird auf die entsprechenden Flächen der Grundplatte aufgeschraubt.

§ 153. Brown, Boveri & Co. Der Motor Fig. 258[1] von Brown, Boveri & Co. leistet bei 1200 Touren 6 PS, der Ankerdurchmesser ist etwa 150 mm. Der dem Werke „Polyphase Electric Currents" von S. Thompson (2. Aufl.) entnommene Zweiphasenmotor Fig. 259 und 260 von Brown, Boveri & Co. betreibt eine Pumpe. Er giebt bei 544 Umdrehungen und 2500 Volt 100 PS ab. Die Umfangsgeschwindig-

1) Nach Atkinson [illegible] I. E. E. [illegible]

**Drehstrommotor für 2**

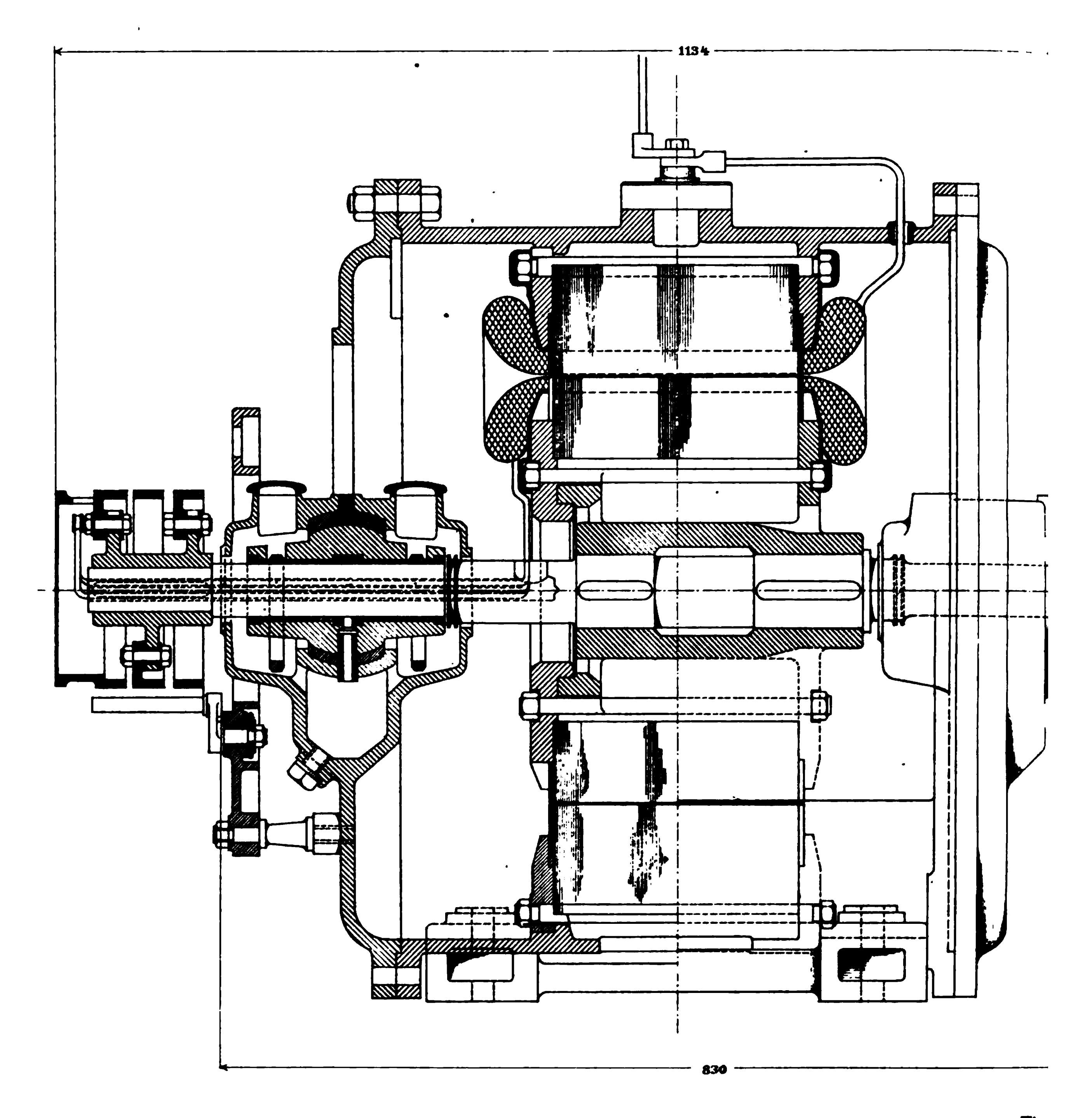
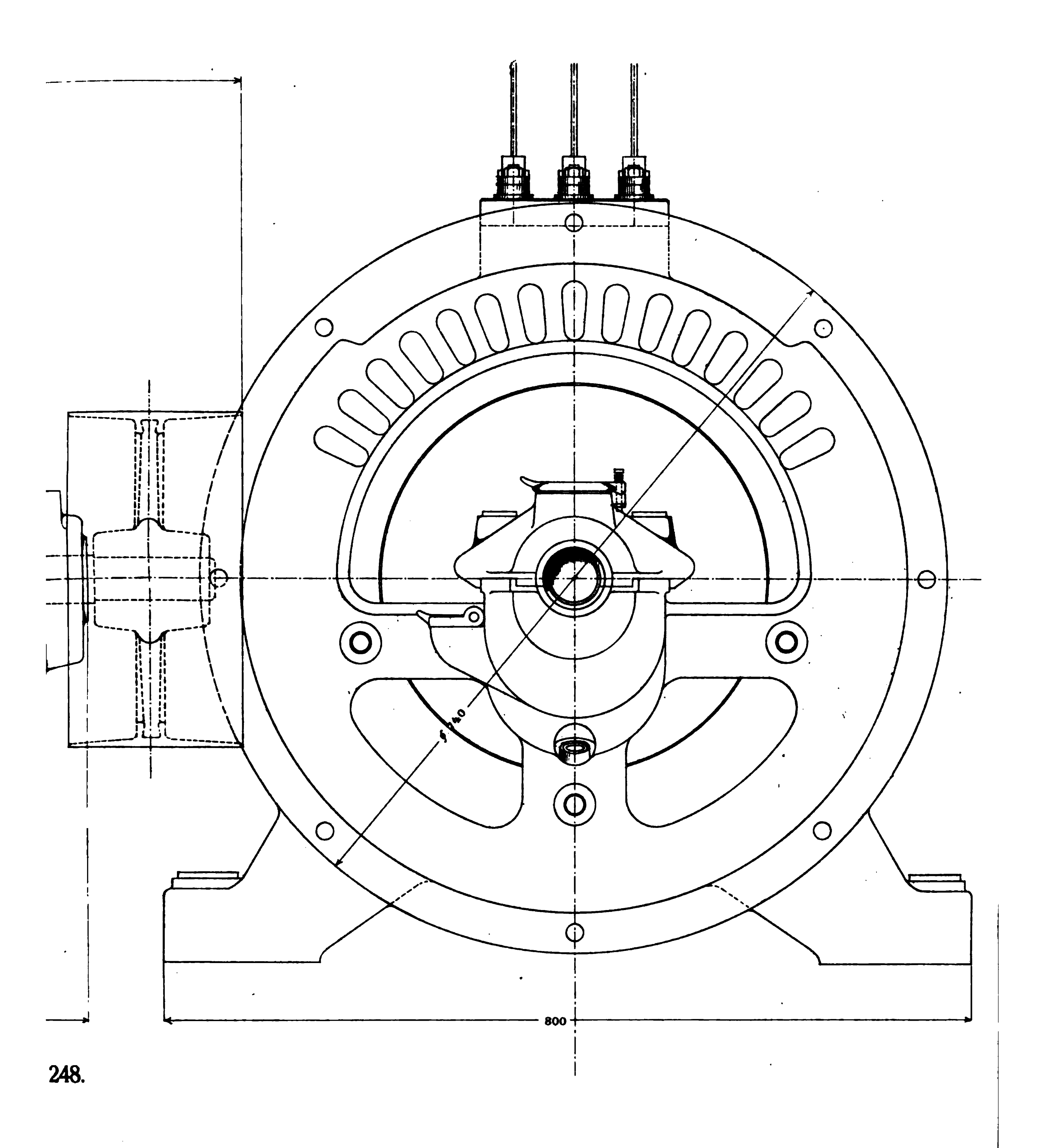



Fig.

**) PS. von Kolben & Co.**




248.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

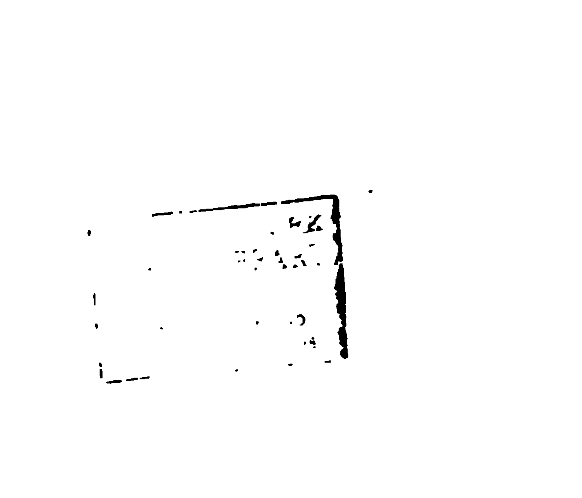
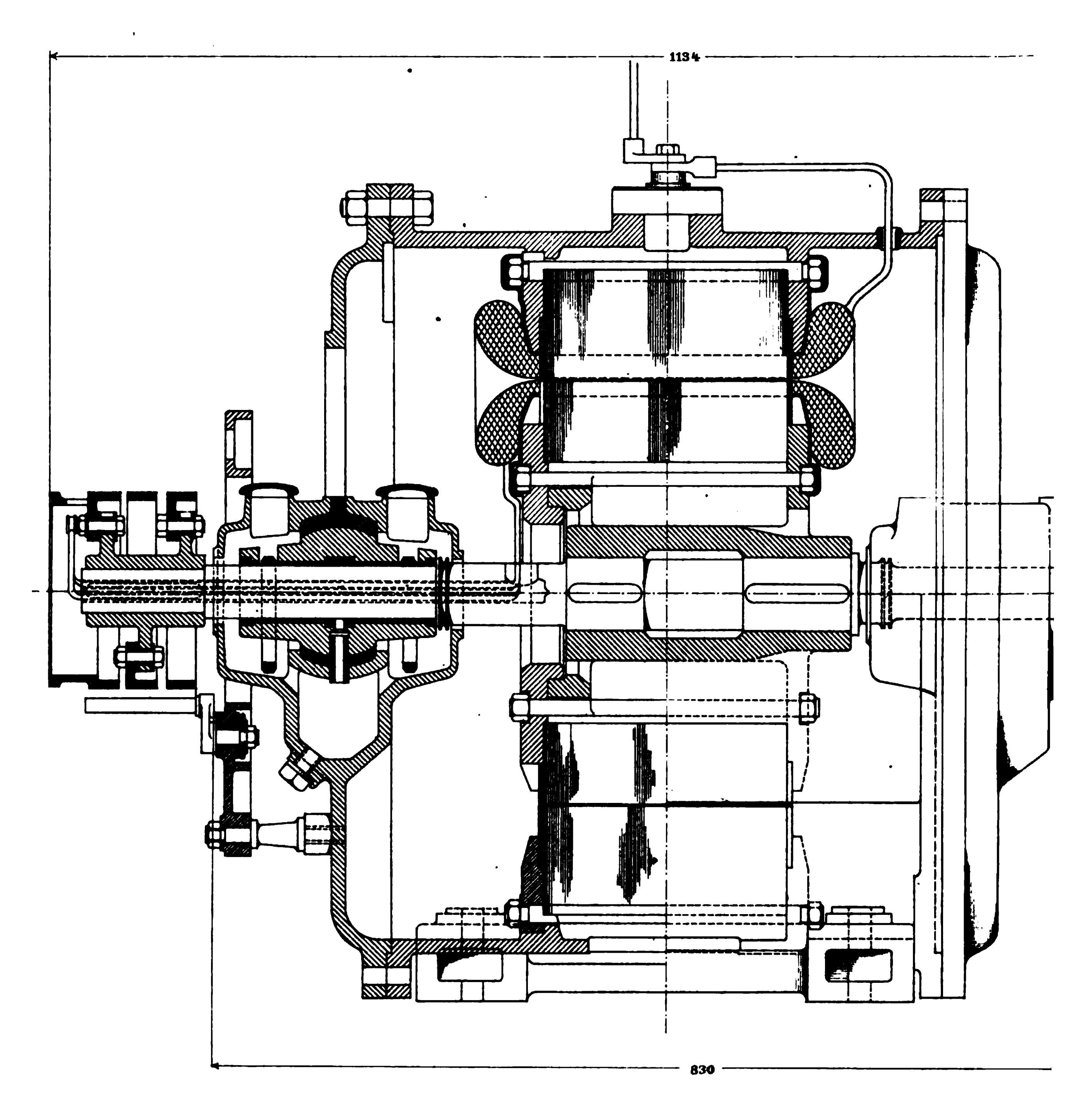


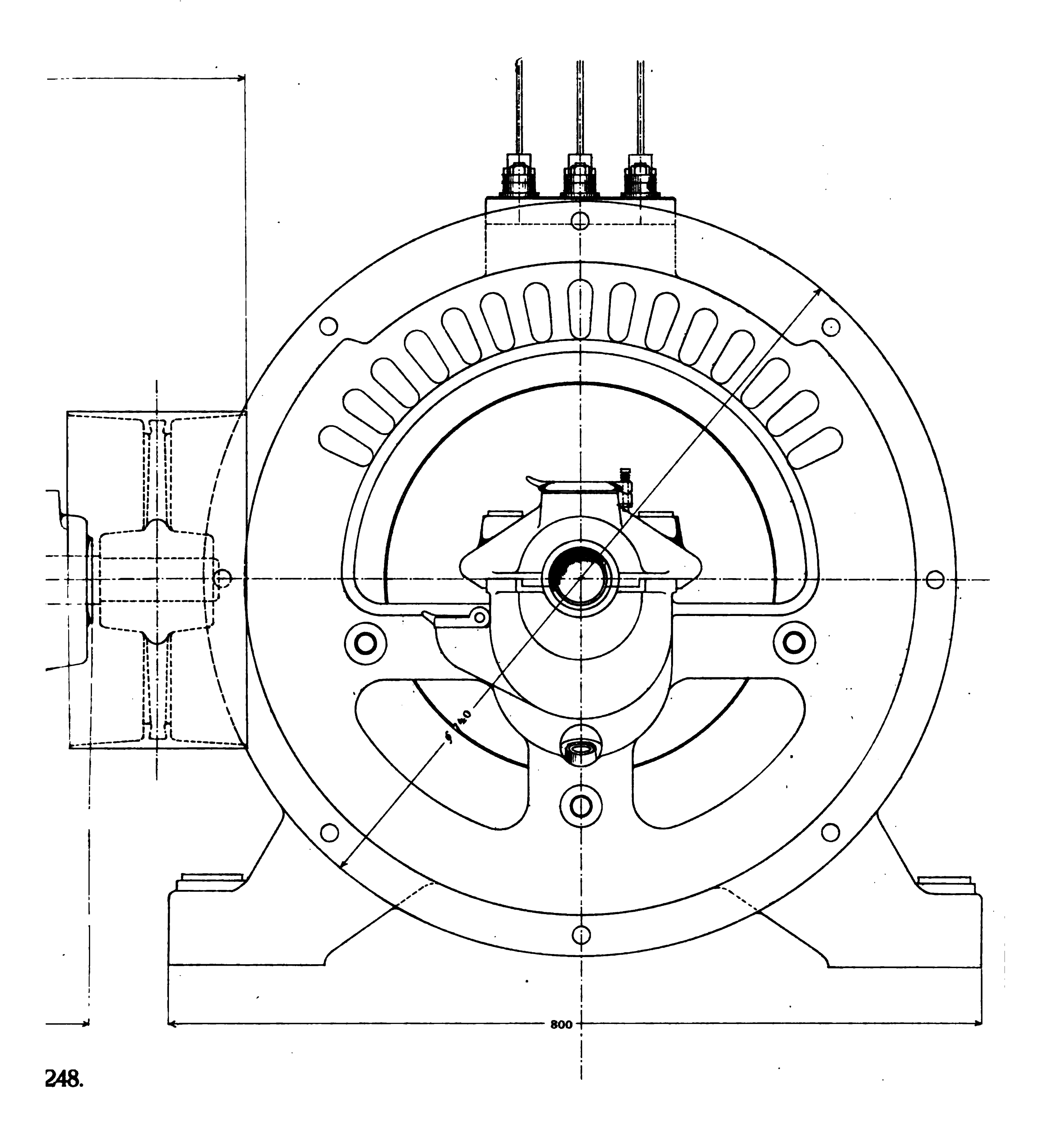


Fig. 250. 120 PS-Drehstrommotor von Kolben & Co.




Fig

PS. von Kolben & Co.




248.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

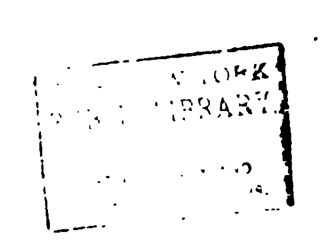




Fig. 250. 120 PS-Drehstrommotor von Kolben & Co.

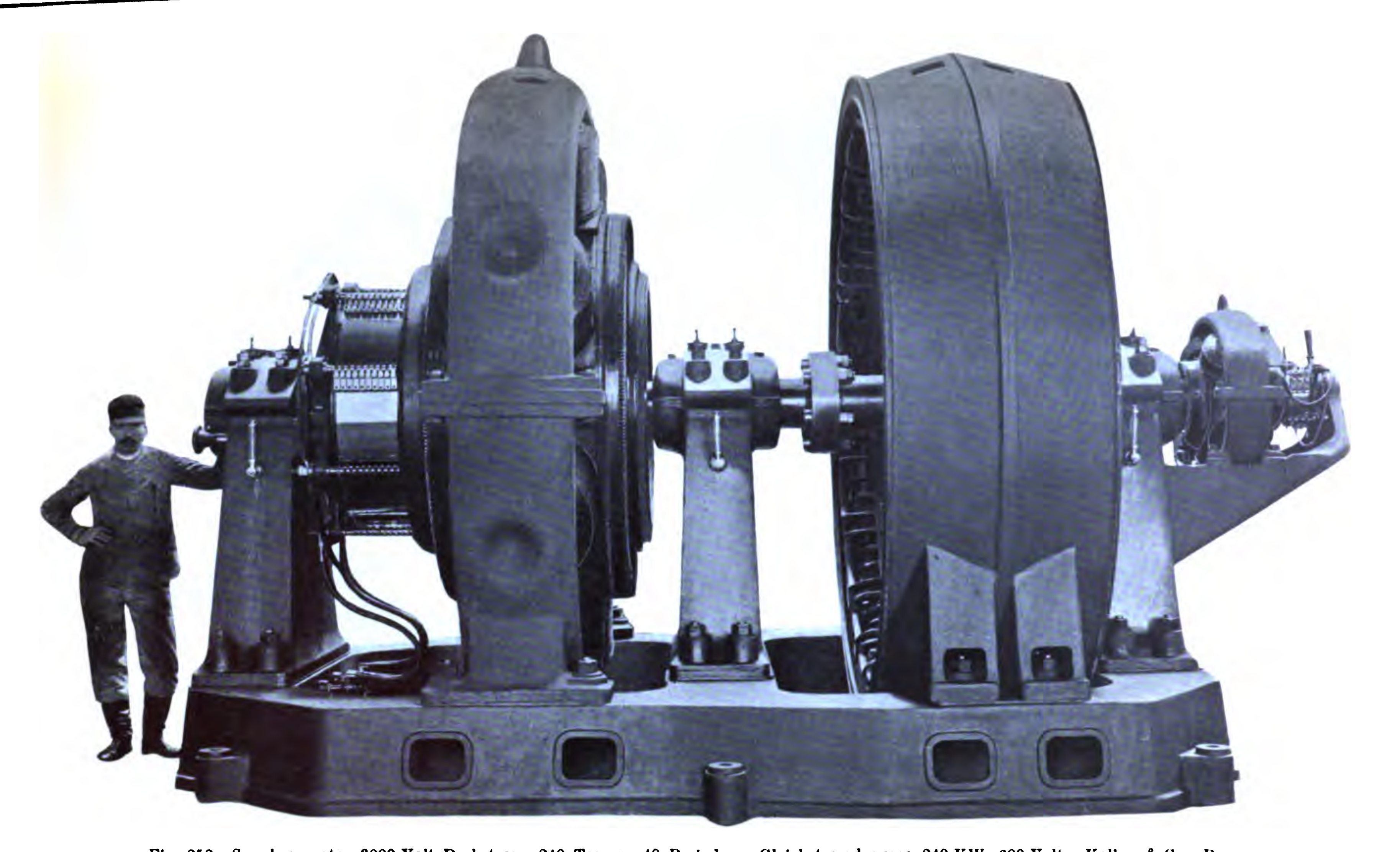
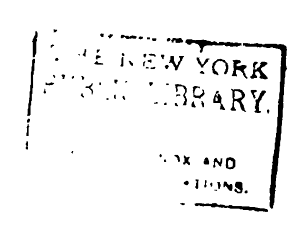
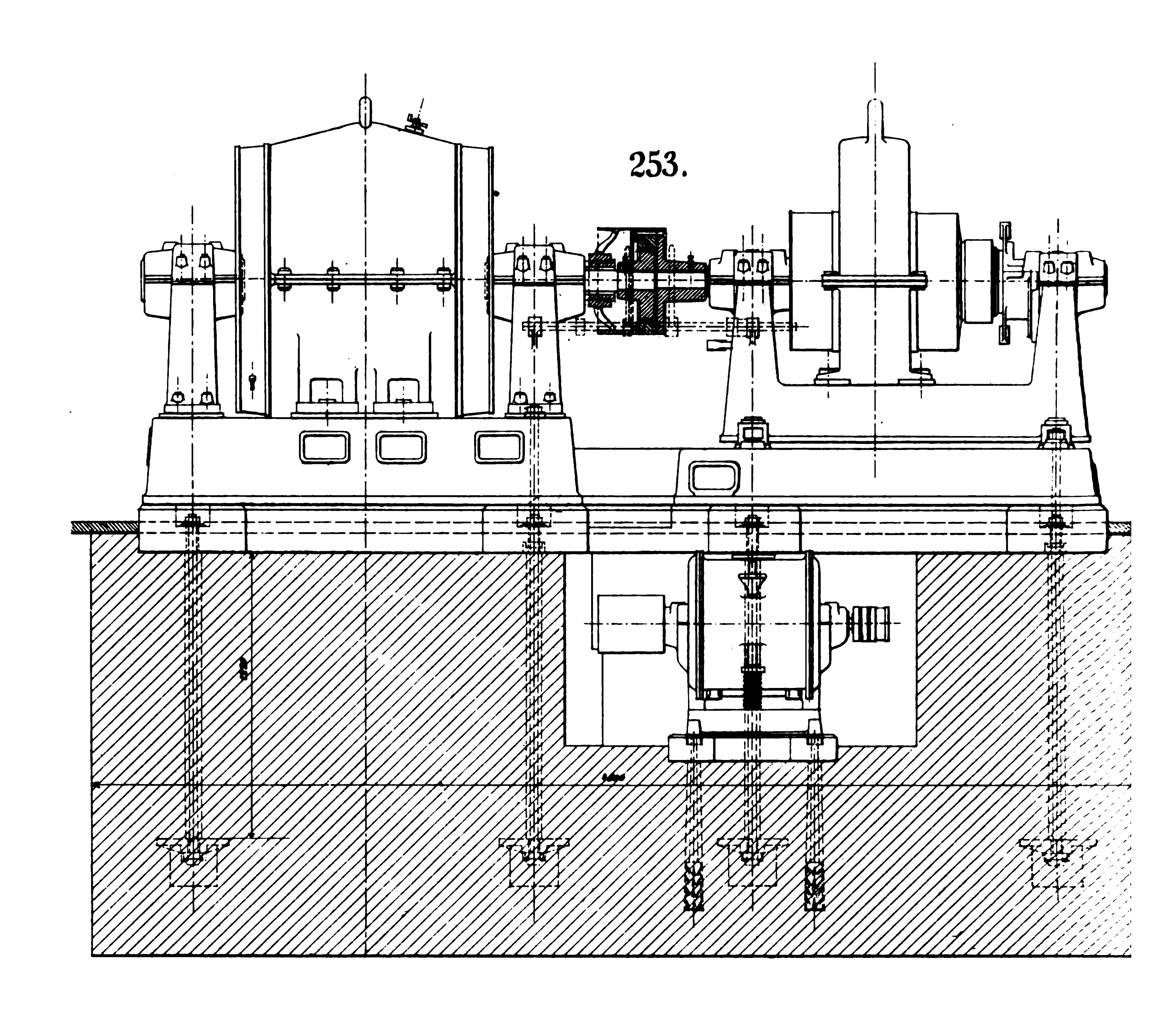
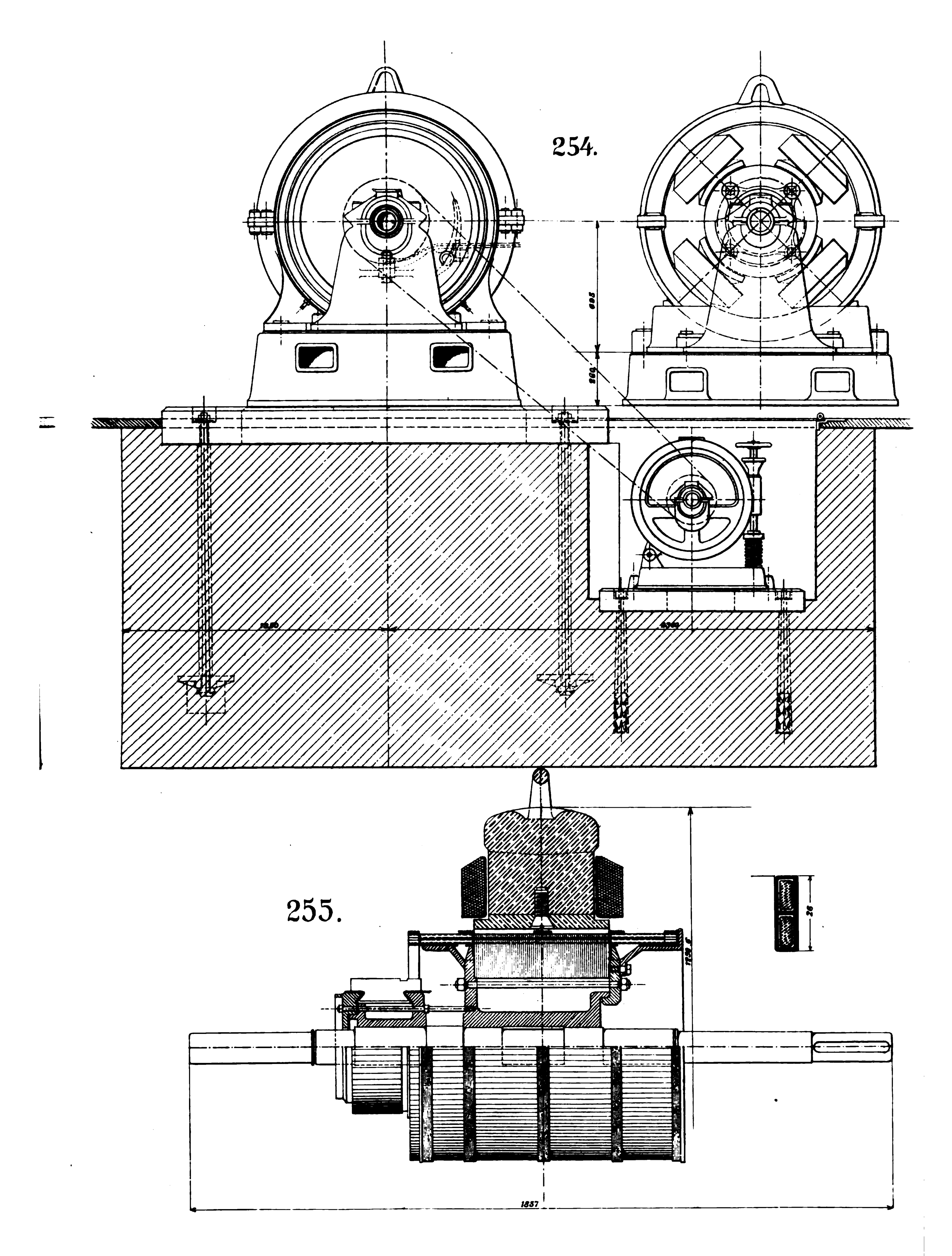


Fig. 252. Synchronmotor 3000 Volt Drehstrom, 240 Touren, 48 Perioden. Gleichstromdynamo 240 KW, 600 Volt. Kolben & Co., Prag.






**Motor-Generator der B. A.-G. vorm. Kolben & Co.**




Verlag von S. Hirzel-Leipz.

keit beträgt über 40 m/sec. Der grossen Länge halber ist er als Doppelmotor ausgeführt, jede Hälfte hat einen Luftkanal. Der Rotor hat Stab-

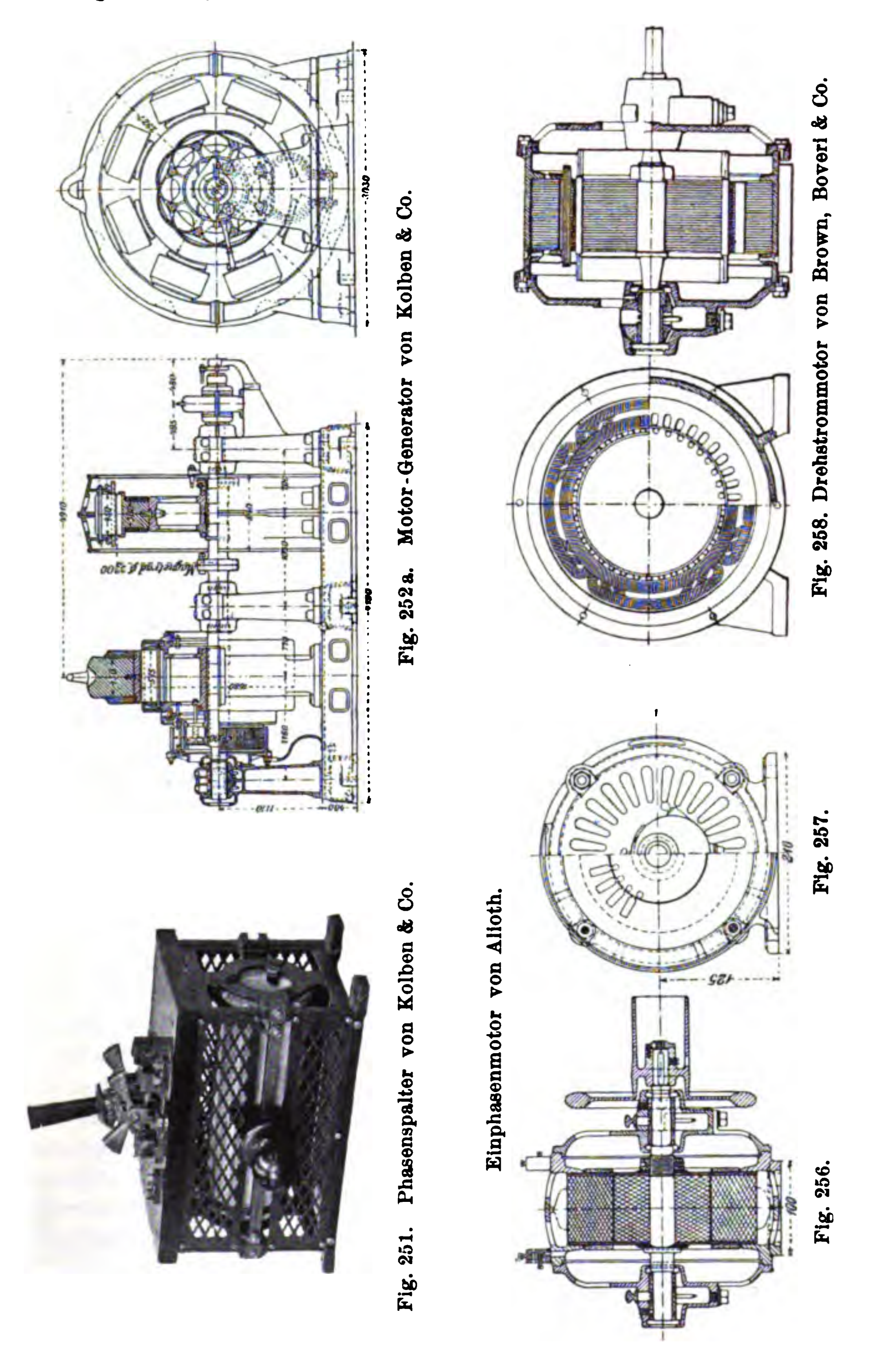


Fig. 251. Phasenspalter von Kolben & Co.

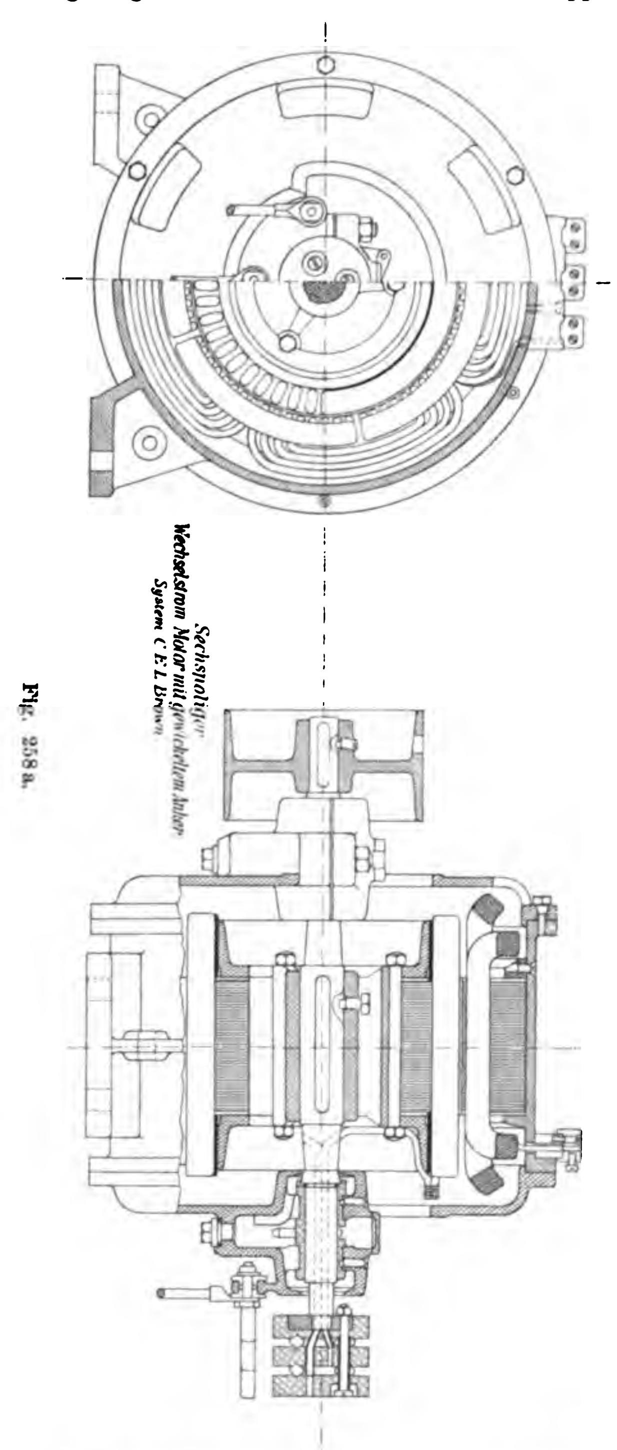
Fig. 252 a. Motor-Generator von Kolben & Co.

Fig. 256. Fig. 257. Einphasenmotor von Alioth.

Fig. 258. Drehstrommotor von Brown, Boveri & Co.

Fasswicklung (zwei Stäbe pro Nut), der Stator hat Drahtwicklung, aussen und innen sind die Nuten geschlossen. Der Anker ist in Lagerschildern gelagert. Das Gehäuse kann bei Reparaturen über den Anker weggeschoben

werden. Die Schleifringe sind ausserhalb der Schilder an einen Wellenflantsch luftig angeschraubt. Für elektrische Schleppschiffahrt verwendet Brown, Boveri & Co. den Kapselmotor Fig. 261[1]), der bei 600 Volt, 600 Touren, 40 Perioden ca. 5 PS abgiebt. Die Netzspannung liegt am rotierenden Teil, letzterer hat offene Nuten und leicht ersetzbare Spulen *E*. Der Strom wird den Schleifringen *B* vermittelst Kohlenbürsten zugeführt. Die Bleche des sekundären, stehenden Teiles sind durch Presskeile in der Umfangsrichtung angepresst. Der Antrieb der elektrischen Lokomotive der Gornergratbahn von Brown, Boveri & Co. ist in Fig. 262 und 263[2]) schematisch skizziert. Jeder der beiden Motoren leistet bei 540 Volt und 800 Touren circa 90 PS; sie sind sechspolig. Bei der Thalfahrt wirken die Motoren als Bremsen (asynchrone Generatoren). Die elektrische Lokomotive der Burgdorf-Thun-Vollbahn ist durch D. R. P. 113 246 geschützt: Die laufenden Teile der ausserhalb des Lokomotivrahmens angeordneten Motoren sind auf gemeinsamer Welle fliegend angeordnet und können für sich abgenommen werden. Mittels zweier ausrückbarer Rädergetriebe erteilen sie den Laufrädern zwei Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Umlaufszahl der Motoren. Fig. 258a entspricht



Sechspoliger Wechselstrom Motor mit gewickeltem Anker System C. E. L. Brown

Fig. 258a.

1) Ecl. El. Bd. 34, No. 31. 2) Z. V. D. I. 1898, p. 962.

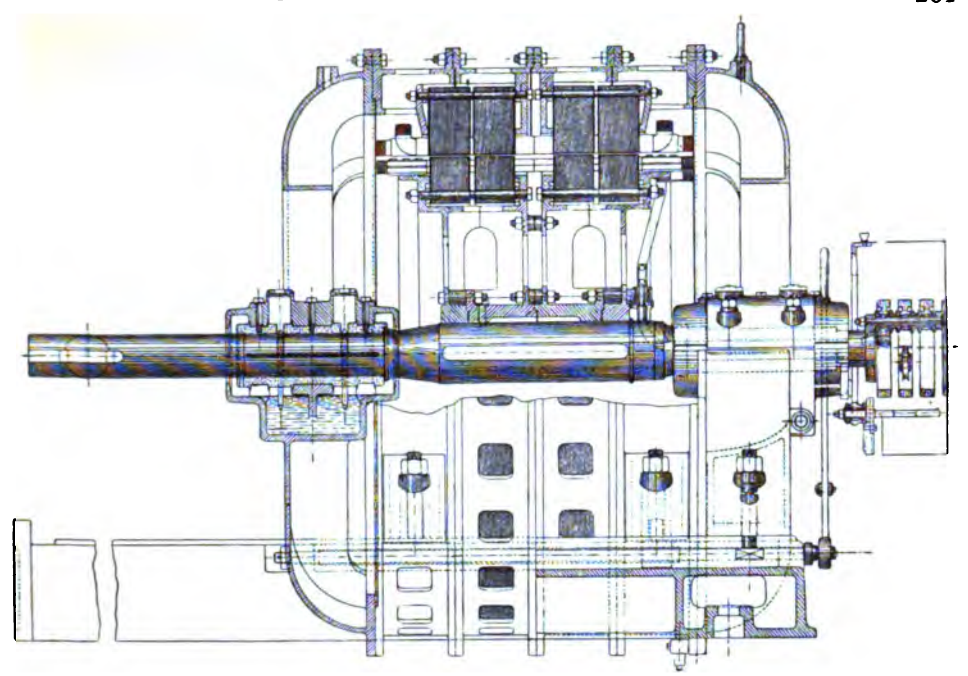


Fig. 259. 1000 PS-Motor von Brown, Boveri & Co.

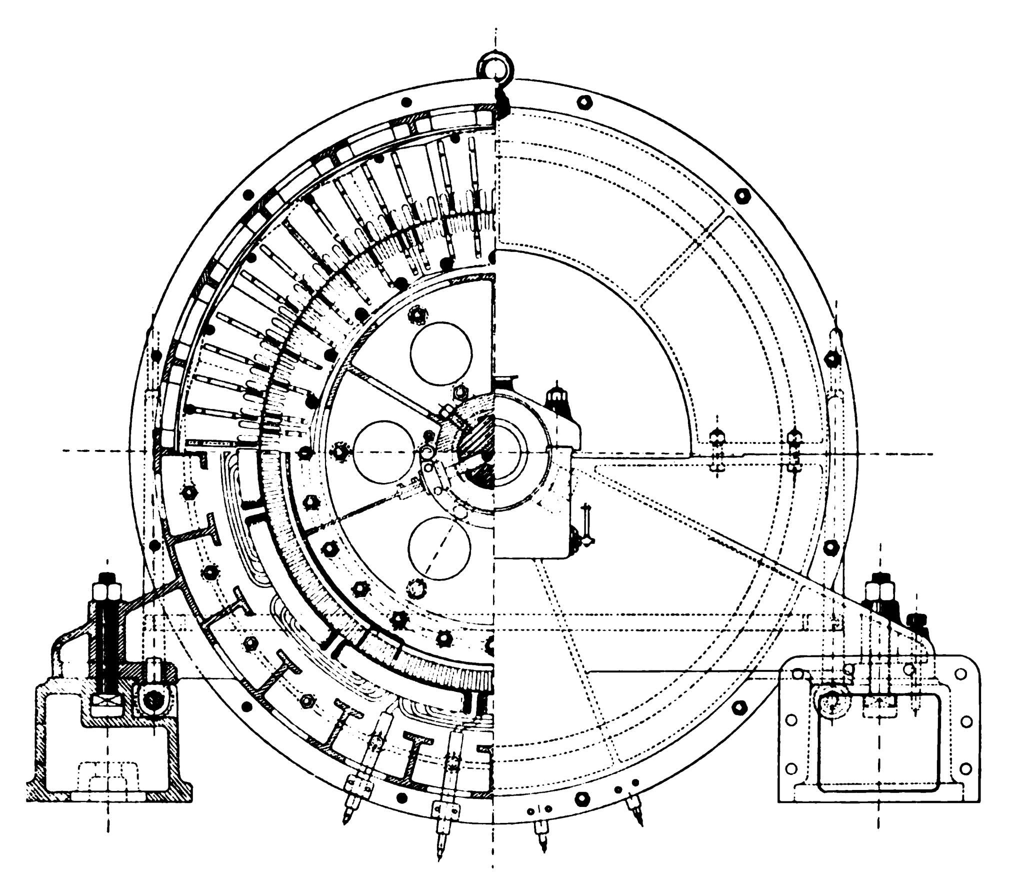


Fig. 260. Massstab: 1 : 24,4.

einem normalen sechspoligen Drehstrommotor mit gewickeltem Rotor. Im Stator sind es vier, im Rotor drei Nuten pro Pol und Phase.

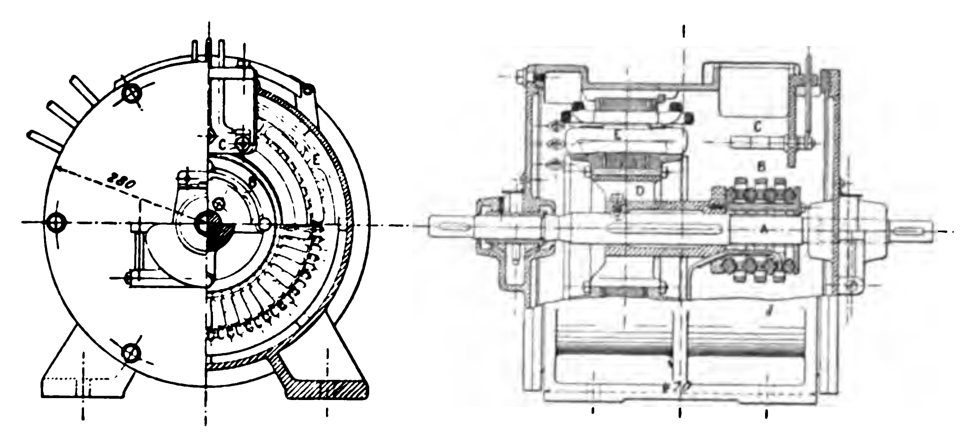


Fig. 261. Kapselmotor von Brown, Boveri & Co.

§ 154. Oerlikon.

Eine Reihe Drehstrommotoren der Maschinenfabrik Oerlikon ist in Fig. 263a—269 zusammengestellt:

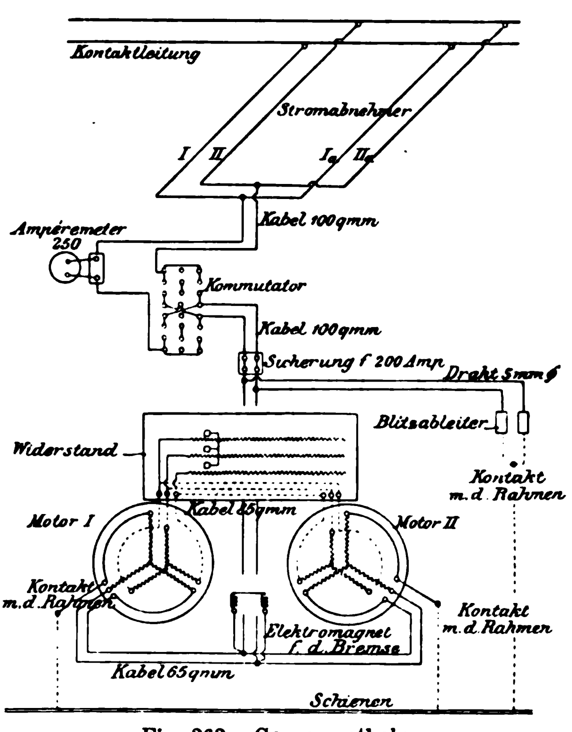



Fig. 262. Gornergratbahn.

Fig. 263a: Leistung $^1/_5$ PS, 900 Touren, Webstuhlmotor, Aufhängung in einer federnden Wippe, Kurzschlussanker.

Fig. 264 und 265 Gesamtbild und Rotor eines 350 PS-Motors mit Kurzschlussvorrichtung und Bürstenabhebevorrichtung.

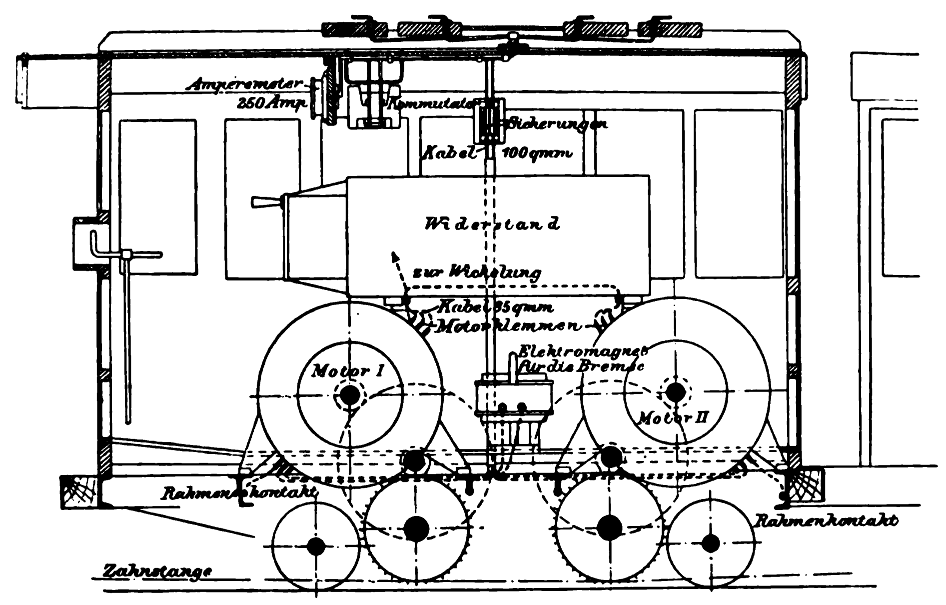



Fig. 263. Gornergrat-Lokomotive.

Fig. 266. Zeichnung eines normalen 14 PS-Motors (6polig): Drahtwicklung innen und aussen, Statorbleche durch Bajonettverschluss gehalten, aussenliegende Schleifringe.

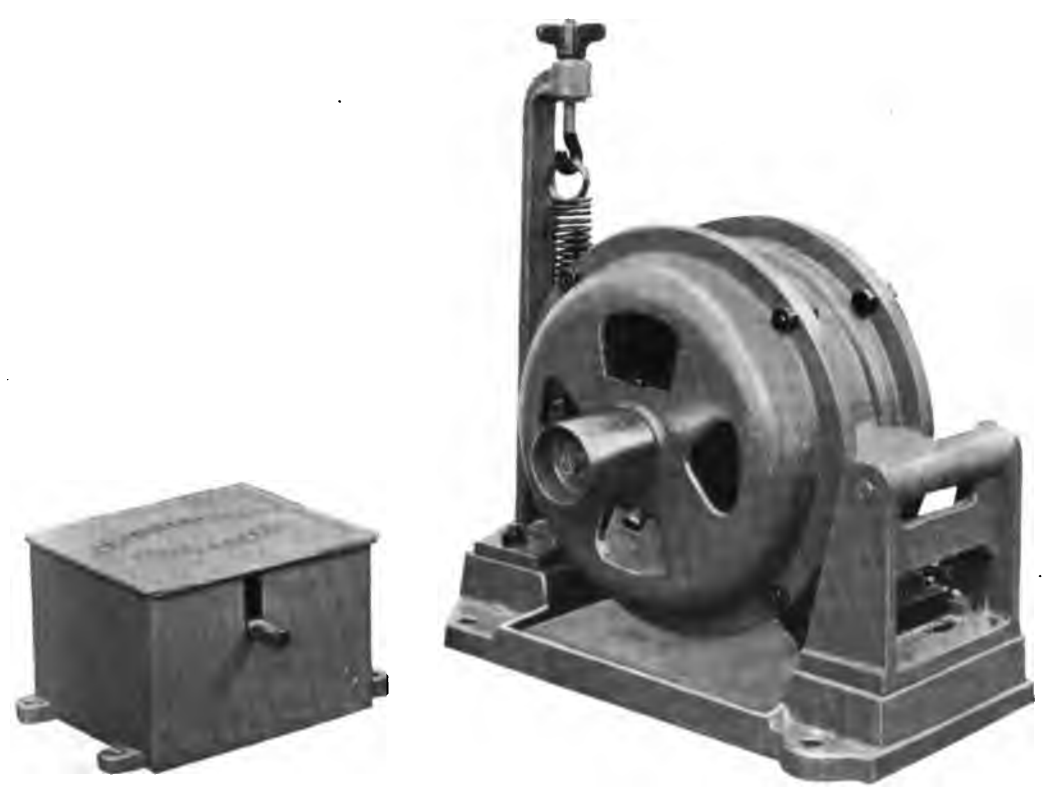


Fig. 263a. Kleiner Drehstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon.



Fig. 264. Drehstrommotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

wickelt, dass nach Lösen von drei Klemmen das Oberteil des Stators abgehoben werden kann, so dass der Rotor frei liegt.

1) Bei der Jungfraubahn verwendet die Maschinenfabrik OERLIKON eine originelle elektrische Bremsung, indem sie bei Thalfahrt die Drehstrommotoren mittelst einer kleinen Dynamo mit Gleichstrom erregt und auf Widerstand arbeiten lässt.

In E. T. Z. 1900, S. 1087 ist ein asynchroner Drehstrommotor von 600 PS bei 75 Umdrehungen pro Minute abgebildet und beschrieben. Da der Motor eine unterirdische Wasserhaltung betreibt, musste er durch einen Schacht von 1950 $\times$ 2050 mm transportiert werden, weshalb Stator und Rotor zweiteilig sind. Die Periodenzahl beträgt 22,5. Die Bohrung ist 3 m, der Luftspalt 2 mm einseitig, die Polzahl 36. Es sind aussen drei, innen vier Nuten pro Pol und Phase vorgesehen. Die Wicklung liegt bei 1900 Volt Klemmen-

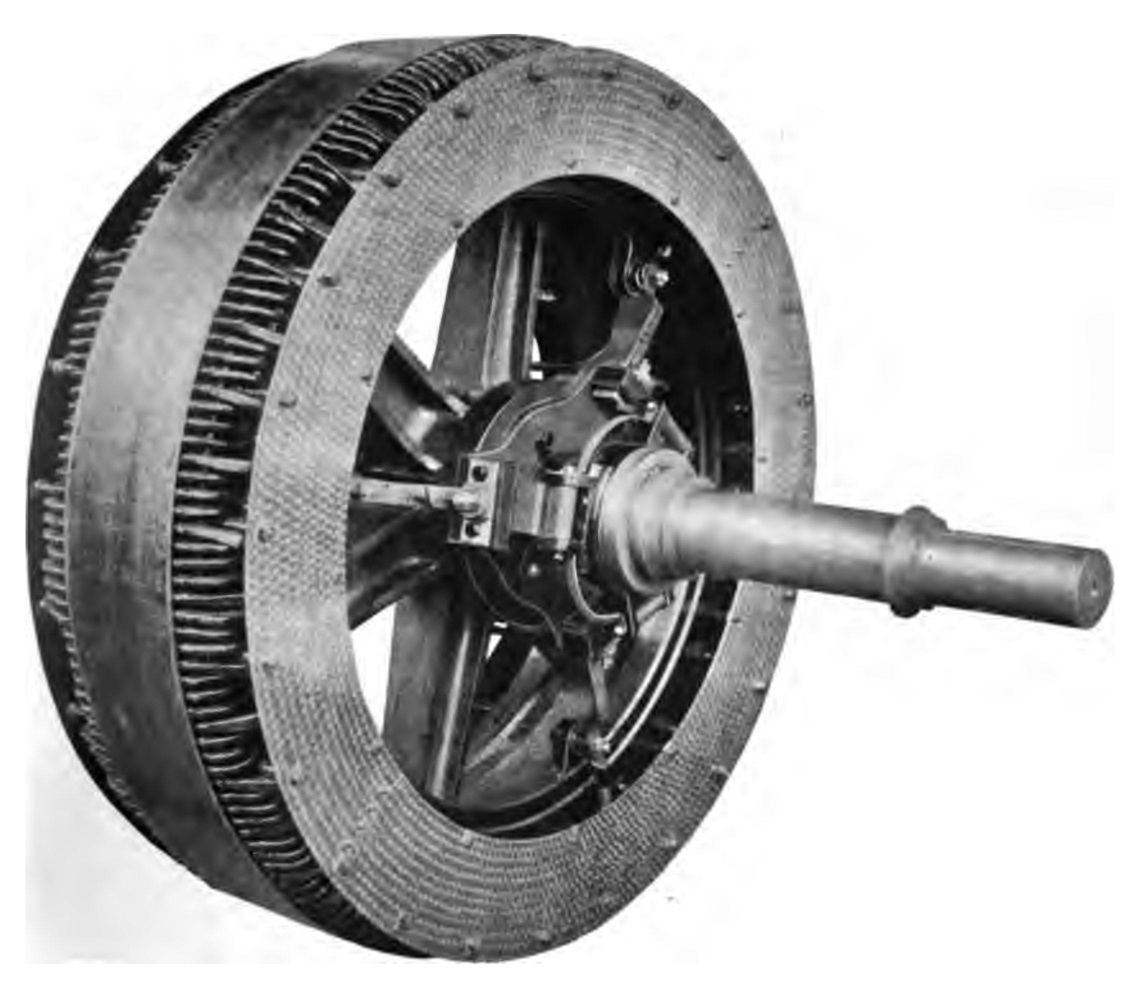


Fig. 265. Drehstrommotoranker der Maschinenfabrik Oerlikon.

spannung in geschlossenen Micanithülsen. Das Anlassen erfolgt bei vollem Moment mit Hilfe eines Konstantanwiderstandes (gusseiserne Schleifringe), nach Erreichung der Tourenzahl wird eine Kurzschlussvorrichtung bethätigt. Das Gehäuse ist durch zwei Gusssterne mit sechs Armen versteift, welche auf den beiden Lagerböcken aufsitzen und nach Lösen von drei Schrauben mit dem Gehäuse gedreht werden können. Die Blechkörper sind mittels 54 Bolzen von 20 mm Durchmesser mit ihren Gussringen verschraubt. Der äusserste Durchmesser ist 4 m, die Breite 900 mm, das Totalgewicht 28 t, 9 t Eisenblech und 1,4 t Kupfer. Der Rotor wiegt 11 t. Der Leerlauf ver-

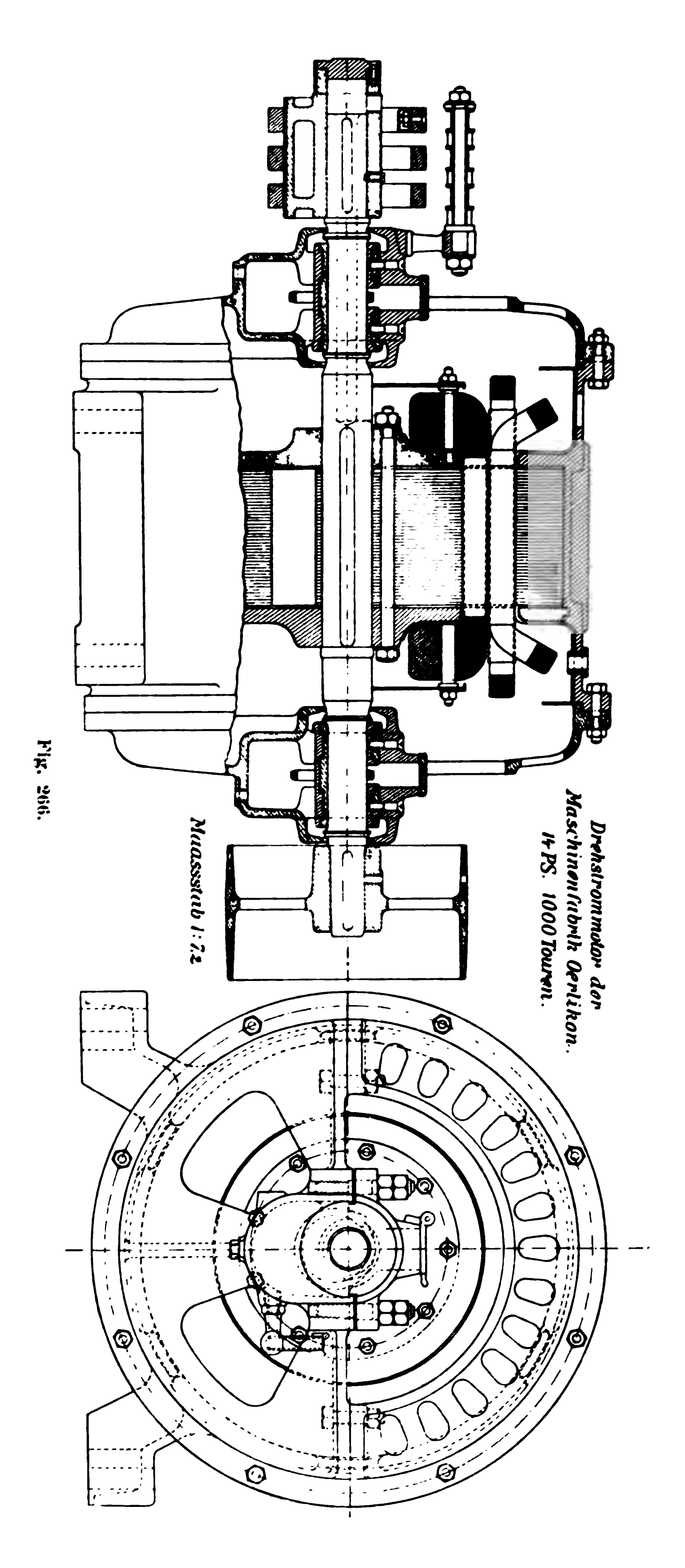

Drehstrommotor der
Maschinenfabrik Oerlikon.
14 PS. 1000 Touren.
Maassstab 1:7,2

Fig. 266.

14poliger Drehstrommotor d.
Maschinenfabrik Oerlikon:
500 PS. 380 T. 5000 V.

Maassstab 1:23½.

Fig. 267.

Fig. 208. Laufkran der Maschinenfabrik Oerlikon.

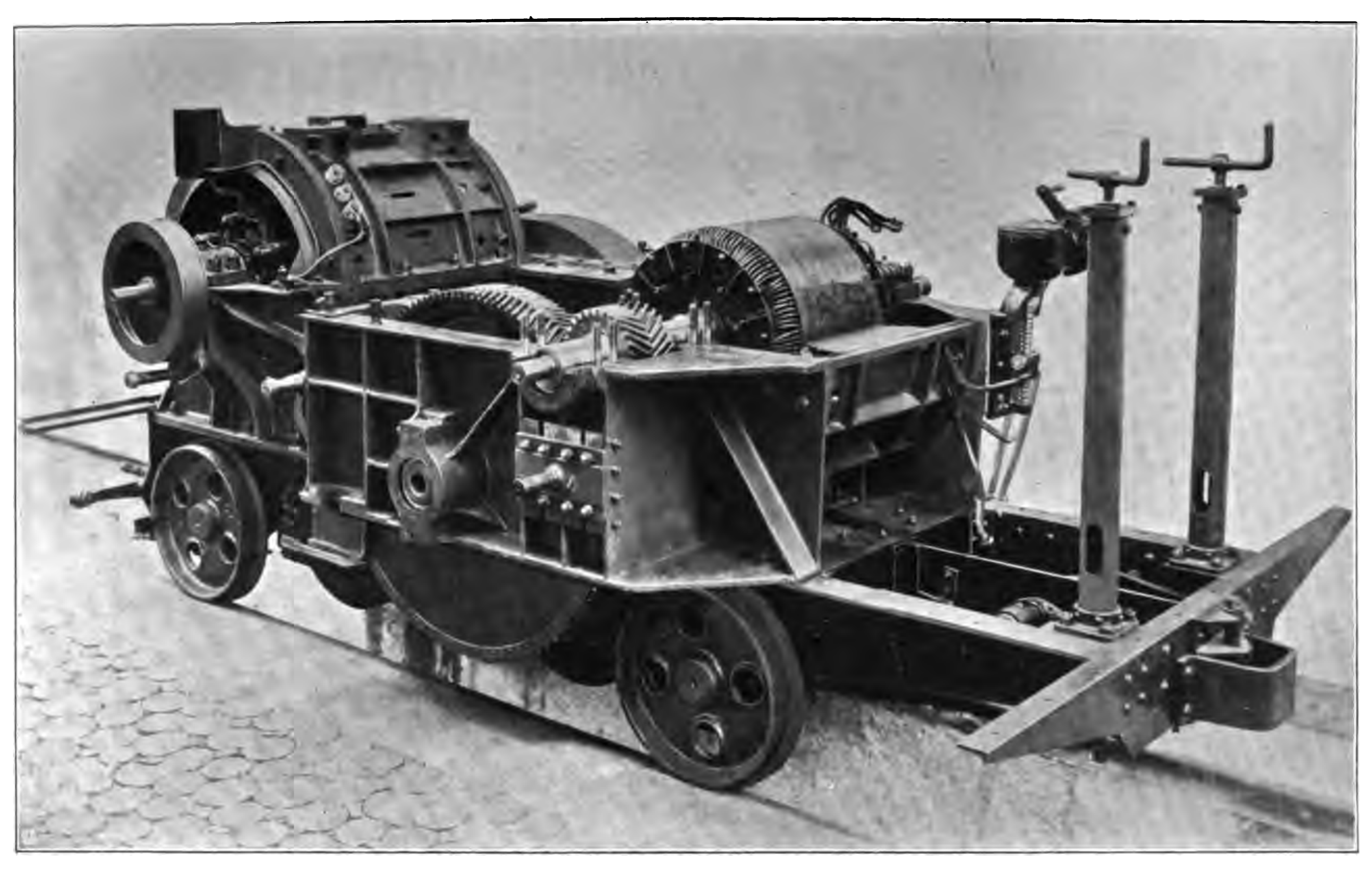


Fig. 269. Drehstromlokomotive der Maschinenfabrik Oerlikon.

zehrt 16000 Watt. Der $\cos \varphi$ bei Volllast beläuft sich auf 0,82, der Wirkungsgrad auf $\eta = 92\%$, die Schlüpfung auf 2,7%. Das maximale Moment ist zweimal das normale.

Die kleinen Motoren bis 3 PS werden fast ausschliesslich mit Kurzschlussankern ausgeführt und zwar besteht die Bewicklung des Rotors aus



Fig. 270. Kurzschlussanker der Westinghouse Co.

nackten Kupfer- oder Messingdrähten, welche in die Nuten des Rotors gewickelt werden.

Die grösseren Motoren haben Schleifringe und eine Kurzschlussvorrichtung, welche die Ankerwicklung vor der Verbindung mit den Schleifringen kurzschliesst, so dass während des Laufes die Bürsten von den Schleifringen abgehoben werden können.



Fig. 270a. Kurzschlussrotor der Westinghouse Co.

Die Leiter von Stator und Rotor werden ausschliesslich mit isoliertem und nacktem Draht von bequem wickelbarem Querschnitt mit geeigneter Parallelschaltung der einzelnen Drähte in Micanitröhren, welche in die Nuten eingepasst sind, gewickelt. Die Nuten von Rotor und Stator sind an der Oberfläche geschlossen.

Der Leistungsfaktor erreicht bei sämtlichen normalen Typen den Wert 0,9. Die Überlastungsfähigkeit beträgt bei den kleineren Motoren 100, bei den grösseren 50%. Der Nutzeffekt der Motoren über 100 PS wird auf 94% gehalten, die maximale Temperaturerhöhung auf 35° C. Die Schlüpfung beträgt 0,5—1,5%. Die Motoren unter 50 PS haben einen scheinbaren Wirkungsgrad von 75 bis 80%.

Der grösste bisher ausgeführte Motor ist für den Antrieb einer Pumpe in einem Bergwerk bestimmt, mit einer Leistung von 750 PS bei 75 Touren. Rotor und Stator sind zweiteilig; die Bohrung beträgt 3300 mm.

§ 155. Westinghouse Co.

Die Westinghouse Co. verwendet in ausgedehntem Masse Motoren mit Kurzschlussankern und zwar auch noch bei grossen Leistungen. Fig. 270 zeigt einen grossen Kurzschlussanker; bei kleineren Ankern wird der Kurz-

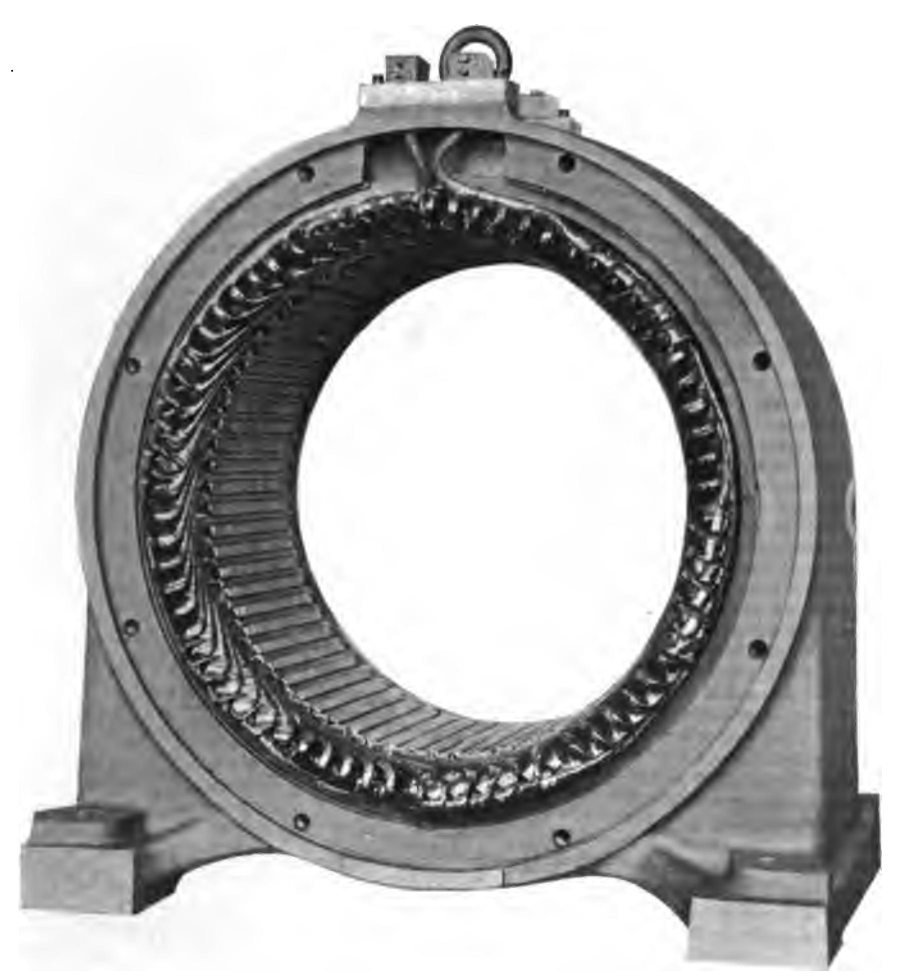


Fig. 271. Zweiphasenmotor (Stator) der Westinghouse Co.

schlussring hochkant ausgeführt und mit den Stäben vernietet (Fig. 270a), bei grossen flach gestaltet und mit den flachen Ankerstäben verschraubt.[1]) Die Ankernuten sind wenig geschlitzt und in der Umfangsrichtung länglich, was jedenfalls für geringe Streuung bürgt. An das Gestell sind Ventilationsflügel angegossen. Das Gehäuse zu Fig. 270 ist in gewickeltem Zustande durch Fig. 271 und in ungewickeltem Zustande durch Fig. 272 dargestellt. Die Nuten sind ganz offen, die Wicklung ist schablonenmässig hergestellt.

---

1) Es sind allerdings Wirbelströme in den Stäben zu fürchten.

§ 136. Breguet. Stanley. Wagner. Fischer-Hinnen.

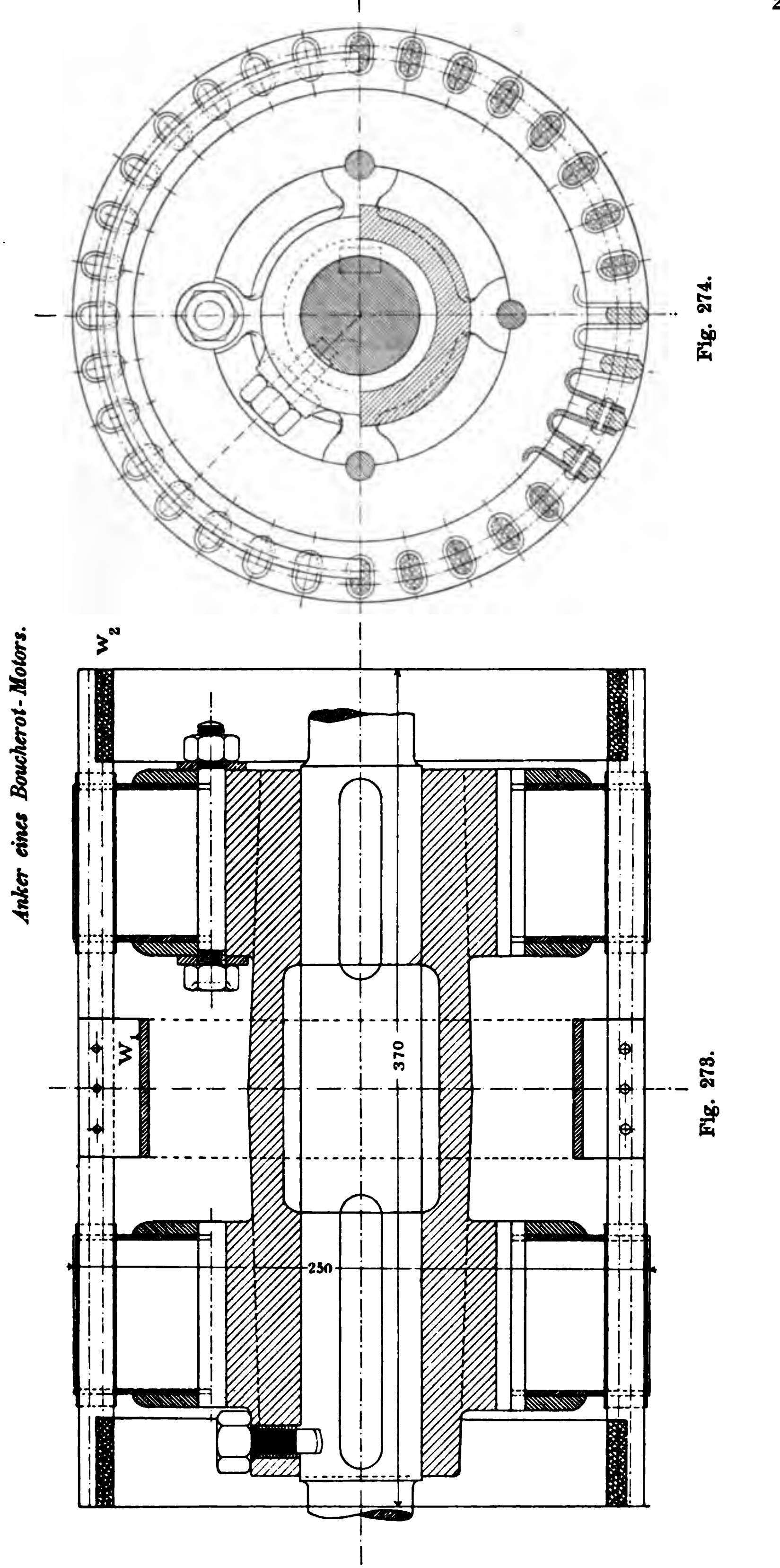
Die früher erwähnten Motoren von BOUCHEROT werden von dem Maison Breguet hergestellt. Die Ausführung der zweiten Type mit einem verschiebbaren Ständer (Seite 136) geschieht nach Fig. 273, 274 und 275. I ist drehbar, II steht fest. Die beiden Ankerwicklungen sind aussen durch die Kupferringe $W_2'$ geschlossen. Der Ring $W_1'$ besteht aus Messing und dient



Fig. 272. Drehstrommotorgehäuse der Westinghouse Co.

als Anlasswiderstand. Die Luft ist bei einem Ankerdurchmesser von 250 mm ca. $^3/_4$ mm.

Die Stanley El. Mfg. Co. baut Zweiphasenmotoren, deren Ständer aus zwei axial nebeneinanderliegenden Einphasenwicklungen besteht; Fig. 276 und 277, wobei die eine Polreihe NS gegen die andere um 90° versetzt ist. Die Ankerwicklung [illegible] läuft längs beider Ständer hin und ist ebenfalls zweiphasig.




Anker eines Boucherot-Motors.

Fig. 273.

Fig. 274.

Der Einphasenmotor (Fig. 278) der **Wagner El. Mfg. Co.** läuft als Kollektormotor (Repulsionsmotor) mit radialem Kollektor an, nach Erreichung einer gewissen Tourenzahl wird der Anker durch einen Centrifugalregulator

Fig. 275.

*Boucherot-Motor vom Maison Breguet.*

kurzgeschlossen und die Kohlenbürsten werden abgehoben, so dass der Motor als Induktionsmotor weiterläuft. Der Drehsinn bezw. das Anzugsmoment …haupt hängt von der Bürstenstellung ab.



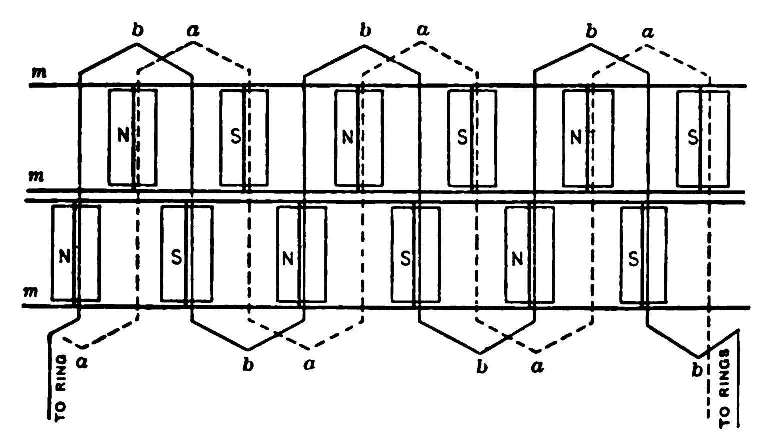



Fig. 276. Schema des Stanley-Motors.

Der vierpolige Drehstrommotor Fig. 279 für ca. 10 PS von Fischer-Hinnen hat im Stator vier Nuten pro Pol und Phase und im Rotor deren

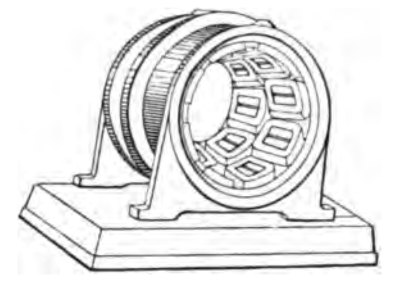


Fig. 277. Zweiphasenmotor der Stanley El. Mfg. Co.

fünf. Beide Teile sind drahtgewickelt. Die Bleche sind durch Nieten zusammengepresst. Die Rotorbleche werden direkt auf die Achse geschoben.

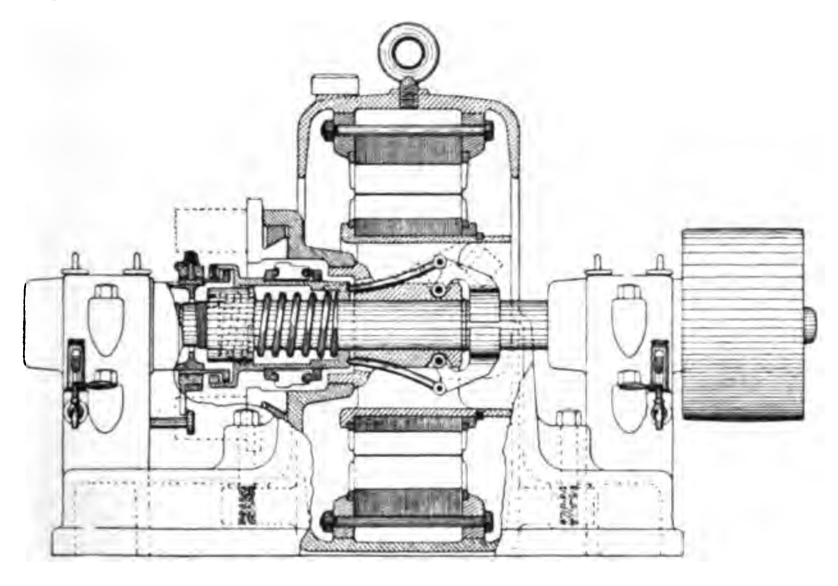


Fig. 278. Einphasenmotor der Wagner El. Mfg. Co.

Das Gehäuse hat Kastenquerschnitt. FISCHER-HINNEN hat am Schluss seines Aufsatzes in der Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1900, Heft 29ff. Kon-

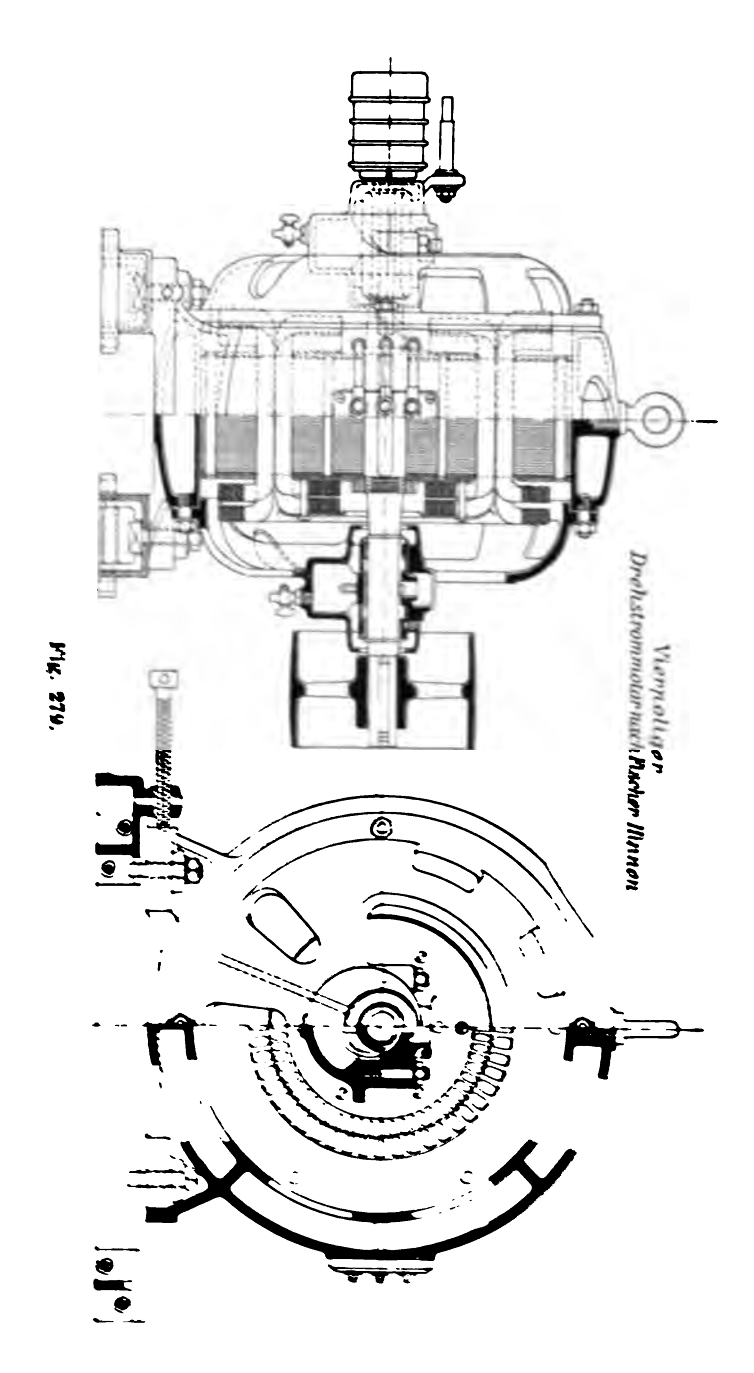


Fig. 274. Vierpoliger Drehstrommotor nach Fischer-Hinnen

[illegible] für etwa [illegible] Drehstrommotoren verschiedener Firmen von [illegible] bis 15[illegible] PS zusammengestellt.

[illegible] verhältnismässig wenig

Interessantes, da die Variation wenigstens in den wichtigen Grundzügen sehr beschränkt ist.

Es handelt sich im Wesentlichen darum, zwei mit Nuten versehene, lamellierte Blechringe einmal in einen Gusskörper mit Welle, das andere Mal in ein Gussgehäuse mit Füssen einzubauen und entsprechende Steh- oder Schildlager vorzusehen. Eine Zwei- oder Mehrteilung der Drehstrommotoren vermeidet man, wo immer angängig. Es giebt besondere Wicklungen (siehe Handbuch, Bd. IV), die es ermöglichen, alle Stirnverbindungen über die Stossfuge weg zu vermeiden. Bei geteilten Rotoren ist die Stossverbindung im Eisen besonders zuverlässig, z. B. mit Verzapfung und aufgeriebenen Bolzen auszuführen. Bei kleinen Motoren ist das Gehäuse ein einfacher Cylinder mit Flantschen oder Rippen, bei grossen wird es gewöhnlich mit Kastenquerschnitt gebaut. Ein Pressring für die Bleche ist meist angegossen, auch an dem Rotorstern. Die Füsse werden für kleine Typen öfters an die Lagerschilder angegossen. Über Blechbefestigungen siehe Seite 64. Die Wicklung wird in Europa selten, in Amerika fast ausschliesslich schabloniert (halb oder ganz offene Nuten); hierzulande wird die Wicklung meist von Hand durch die Nuten gezogen oder durch den Schlitz gelegt (nahe- oder ganz geschlossene Nuten). Für Rotoren über 30 bis 40 PS und grosse Niederspannungsstatoren empfiehlt sich Stabwicklung: Seiten- oder Fasswicklung, wobei die Stäbe von der Seite (meist) oder von oben in die Nuten geschoben werden. Die Schleifringe können ausser- oder innerhalb der Lager liegen. Im ersten Falle muss die Achse durchbohrt werden und man erhält kürzere Lagerabstände, aber die Ringe und Bürsten sind sehr exponiert.

---

# C. Thermomagnetische Motoren.[1])

§ [illegible] Thermomagnetische Motoren.

Diese Motoren haben nie das experimentelle Stadium überschritten. Die thermomagnetischen Motoren beruhen auf dem von Dr. WILLIAM GILBERT entdeckten Prinzip, dass ein Eisenstab bei Rotglut seinen Magnetismus verliert. Dr. G. GORE erzeugte 1868 durch diesen mittelst Wärmeänderung erzeugten Wechsel im Magnetismus induzierte Ströme. 1870 stellte Dr. O. LODGE ähnliche Versuche an. Im Jahre 1878 bauten E. THOMSON und E. J. HOUSTON einen thermomagnetischen Motor, der aus einer drehbaren Eisenscheibe zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten bestand. Ein Teil der Scheibe wurde erhitzt, der übrige blieb kalt, so dass eine Rotation entstand. Der Wirkungsgrad war natürlich sehr schlecht. C. K. MC GEE entwarf 1884 eine ähnliche Maschine; ebenso SCHWEDOFF. Am meisten Beachtung wurde dem pyromagnetischen Motor[2]) von TH. A. EDISON 1887 geschenkt: Der Anker, der zwischen den Polen eines Elektromagneten drehbar angeordnet war, bestand aus zahlreichen Eisenröhren, die in unsymmetrischer Weise von kalter und sehr heisser Luft durchströmt wurden. MENGES (Holland) gab sich mit einer im Prinzip ähnlichen Maschine ab. C. HERING bespricht 1887 in dem Journal of the Franklin Institute diese Motoren ganz allgemein in kritischer Weise. Er sagt, dass solchen Maschinen praktische Schranken gezogen sind: 1) Es ist die Geschwindigkeit des Kraftlinienschneidens sehr beschränkt, die obere Grenze ist z. B. 12 Erwärmungswechsel per Minute. 2) Die Maschinen verschleissen rasch.

---

1) Nach The Electric Motor von MARTIN und WETZLER.

2) Siehe auch KITTLER, Handbuch der Elektrotechnik Bd. II.

# Namen- und Sachregister.

**(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)**


Abfallwert von Drehstrommotoren 80.
Abmessungen von Drehstrommotoren 118.
A. E.-G. 31 (Gleichstrom), 123, 125, 178 (Drehstrom).
Alioth 196.
Allmäna Svenska E.-A. 138.
Amerikanische Motorerfinder 1.
Ampèredrähte 127, 154 (Drehstrom).
Ampèrewindungen 95 (Drehstrom).
Analytische Theorie des Synchronmotors 81.
Ankerrückwirkung 11.
Ankerwicklungen 133.
Anlasser 24, 32 (Gleichstrom), 148, 153 (Drehstrom).
Anlauf 106.
Anlaufsvorrichtungen 72 (für Synchronmotoren), 167 (für Einphasenmotoren).
Antrieb 66.
Arago 68.
Asynchronmotor, Wirkungsweise des — 93.
Atkinson 127, 172.

Baily 68.
Barlow 1.
Behn-Eschenburg 99.
Behrend 117, 120, 133, 159.
Beispiele moderner Gleichstrommotoren 31.
— — Drehstrommotoren 178.
Benischke 118.
Bergmann Elektromotorenwerke 55.
Betriebskurven 119 (Drehstrom), 156 (einphasig).
Blondel 112.
Borel 69.
Bourbouze 2.
Boucherot 135, 136, 212.
Bradley 69, 136.
Braun 118.
Breguet 212.
Bremsung 27 (Gleichstrom), 149 (Drehstrom).
Breslauer 116, 127.

Brown, Boveri & Co. 48 (Gleichstrom), 196 (Drehstrom).
Brown, C. E. 72.

Charakteristische Konstanten 16 (Gleichstrom), 155 (Drehstrom).
Cie de l'Ind. El. 49.
Coerper 69.
Compoundmotor 22.
cos $\varphi$ 115 (Drehstrom), 156 (einphasig).

Davidson 1.
Deprez, Marcel, 3, 68.
Déri 138, 193.
Dettmar 9.
Dimensionsformeln 14 (Gleichstrom), 118 (Drehstrom).
Dolivo-Dobrowolsky 71.
Doppelkollektormotor 55.
Drehmoment 4 (Gleichstrom), 93, 105 (Drehstrom), 158 (einphasig).
Drehrichtung 23.
Duncan 70.

Eichberg 163.
Einachsige Wicklung 145.
Einphasenmotor 156, Theorie des —s 159.
Ein- und mehrphasige Wechselstrommotoren 67.
Einteilung der Wechselstrommotoren 67.
Elias 1.
Erens 25.
Erregerstrom des Einphasenmotors 156.
Erwärmungskonstante 10.

Faraday 1.
Farcot 51.
Feldgehäuse 58.
Ferraris, G. 68, 160.
Ferraris & Arno 170.
Fischer-Hinnen 15, 138, 149, 216.
Fontaine 3.
Fort Wayne Co. 74.

Frölich 17.
Froment 1.
Funkenbildung 11.

Ganz & Co. 44 (Gleichstrom), 190 (Drehstrom).
Gegen-EMK 4.
Gegenschaltung 136, 181.
Gegenstrom 28.
Gen. El. Co. 149, 169, 171.
Geschichtliches 1 (Gleichstrom), 67 (Wechselstrom).
Gewicht von Gleichstrommotoren 14.
Gleichpoltype 49.
Gleichstrommotoren 1.
Görges 108, 166.
Gramme 2, 53.
Graphische Methoden 108 (Drehstromdiagramme).
Grundbeziehungen für Gleichstrommotoren 4.
Grundplatte 62.

Haselwander 71.
Heilmann 48.
Helios 32, 69 (Gleichstrom), 123, 157, 179 (Drehstrom).
Henry 2.
Heubach 96, 133, 160.
Heyland 108, 147, 159, 169.
Hilfsmotor 72.
Hissink 152.
Historisches 1 (Gleichstrom), 67 (Wechselstrom).
Hobart 136.
Hopkinson 68.
Hutin & Leblanc 75.
Hub Motor Co. 53, 55.
Hysteresismotor 176.

Impedanzanlasser 138.
Induktionen 16 (Gleichstrom), 155 (Drehstrom).
Induktionsgenerator 114.

Jackson 10, 15, 22, 126, 127, 133.
Jacobi 1, 2.
Joule 1, 2.

Kahlenberg 149.
Kapp 96, 116, 127.
Kapselmotor 35, 53, 200.
Kaskadenschaltung 141.
Koeffizienten für Drehfelder 95, 150.
Kolben 47 (Gleichstrom), 77, 127, 193 (Drehstrom).
Kollektor 65.
Kollektormotoren 172 (einphasig).
Konduktionsmotoren 174.
Körting, Gebrüder 34.
Kranmotor 45.
Krantz 97.
Kummer 35 (Gleichstrom), 180 (Drehstrom).
Kurzschlussanker 133.
Kurzschlussstrom 131.

Lager 63.
Lagerböcke 62.
Lahmeyer & Co. 135.
Leblanc 49.
Leerlaufsverluste 11 (Gleichstrom), 118 (Drehstrom).
Leistungsfaktor 115.
Lenz 2.
Luftspalt von Drehstrommotoren 155.
Lundellmotoren 55, 57.

Magnetisierungsstrom 130 (Drehstrom), 156 (einphasig).
Manchestertype 38.
Maschinenfabrik Esslingen 32.
Mehrphasige Induktionsmotoren 93.

Nebenschlussmotor 20.
Normaler Lauf 108 (Drehstrommotor).
Nutenform 155 (Drehstrom).

Oerlikon 51 (Gleichstrom), 168, 202 Wechsel- und Drehstrom).
Ossanna 81.
Osnos 134.

Pacinotti 2.
Page 2.
Paradoxon 21.
Parshal & Hobart 10, 14, 77.
Pendelungen 19, 89.
Permeabilität 130.
Phasenumformer 81.
Phasenregler 90.
Picou 12.
Pixii & Saxton 68.
Polardiagramm (Drehfelder) 97.
Polumschaltung 147.

Quick 81.

Reaktionsmotoren 176.
Reibungsverluste 152.
Rieter, J. J. & Co. 51.
Ritchie 68.
Rössler 134.
Rothert 127.

Sayers 21.
Schirmspulen 177.
Schlüpfung 93, 115.
Schuckert & Co. 38 (Gleichstrom), 147, 180 (Drehstrom).
Schulthess 2.
Schwartzkopff 42.
Schwingende Motoren 2.

Selbstinduktionskoeffizient 13, 75.
Sengel 21.
Serienmotor 17.
Serienübertragung 49.
Siemens & Halske 42 (Gleichstrom), 121, 136, 157, 169, 181 (Drehstrom).
Siemens, W. v. — 2, 3.
Spannvorrichtung 38.
Stanley Mfg. Co. 212.
Steinmetz 78, 83, 104, 141, 156, 171, 173, 174, 176.
Strassenbahnmotor 43, 50, 62.
Streukoeffizienten 132, 151.
Streuung 127.
Stromdichte 16 (Gleichstrom), 155 (Drehstrom).
Stufenanker 135.
Sturgeons 1.
Synchronmotoren 72, Vergleich mit anderen Motoren 89, Vor- und Nachteile 89.

Tesla 70.
Thermomagnetische Motoren 218.
Theorie des Gleichstrommotors 3, — des Synchronmotors 75.
Thompson, S. 7.
Thomson, E. 68, 177.
Thury 49.
Tischendörfer 169.
Tourenänderung 28 (Gleichstrom), 147, 154 (Drehstrom).
Tourenzahl 14.
Traktionszwecke 6.

Überlastungsfähigkeit 82, 115.
Übertemperatur 10.
Übliche Motorformen 58.
Umfangsgeschwindigkeit 154.
Umformer 79, 89.
Umlaufszahl 4.
Union E.-G. 43 (Gleichstrom), 138, 189 (Drehstrom).

Verluste in den Polschuhen 9.
V-Kurve 77.
Vollbahnmotor 42, 45.
Vollständiges Drehstromdiagramm 113.
Volumen von Gleichstrommotoren 14.

Wagner El. Mfg. Co. 214.
Wannseebahn 42.
Webstuhlmotoren 189.
Wenström 71.
Westinghouse Co. 71, 120, 211.
Wicklungen 149.
Wilde 68.
Wilson 71.
Wirkungsgrad 7 (Gleichstrom), 86, 117 (Drehstrom), 157 (einphasig).

# 2. Abteilung.

---

## Elektromotoren

und

## elektrische Arbeitsübertragung

bearbeitet

von

**Ernst Schulz**
Direktor der Magdeburger Elektromotoren-Fabrik

---

Mit 77 Abbildungen.

# Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1

Erster Hauptteil.

## Elektromotoren.

### A. Gleichstrom.

Allgemeines . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5
Magnetschaltungen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5
Der Nebenschlussmotor . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5
Hauptstrommotoren . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 16
Compoundmotor . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 23
Vorzüge und Nachteile der besprochenen Motorschaltungen und ihrer Anwendung in der Praxis . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 24
Besondere Motorschaltungen für maschinelle Zwecke . . . . . . . . . . . 24
Entwurf und Berechnung von Gleichstrommotoren . . . . . . . . . . . . 28
Unterschiede zwischen Motor und Dynamo . . . . . . . . . . . 28
Beispiel einer Berechnung . . . . . . . . . . . . . . . . 32
Prüfung von Gleichstrom-Elektromotoren . . . . . . . . . . . . . . 41
Leistung und Temperaturerhöhung . . . . . . . . . . . . . 42
Funkenbildung, Gründe für dieselbe . . . . . . . . . . . . 44
Bürsten verschiedener Systeme . . . . . . . . . . . . . . 45
Wärmequellen, insbesondere der Ankererwärmung . . . . . . . . 47
Isolation, Feuchtigkeit, Austrocknen . . . . . . . . . . . . 50
Gründe zu hoher Tourenzahl . . . . . . . . . . . . . . . 51
Nutzeffekte, Verluste . . . . . . . . . . . . . . . . . . 52

### B. Drehstrom.

Allgemeines . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 55
Schaltungen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 56
Ständerwicklung zweiphasig . . . . . . . . . . . . . . . . 57
Ständerwicklung dreiphasig . . . . . . . . . . . . . . . . 59
Fehlerhafte Schaltungen . . . . . . . . . . . . . . . . . 60
Technische Ausführungen . . . . . . . . . . . . . . . . . 60
Analogie des Induktionsmotors mit dem Transformator . . . . . . . 60
Anordnungen von Nuten . . . . . . . . . . . . . . . . . . 61
Nutenzahlen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 64
Tourenzahl . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 64
Läuferwicklungen . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 66
Kurzschlussläufer . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 66
Schleifringläufer . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 67
Anlasswiderstände . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 67
Änderung der Tourenzahl . . . . . . . . . . . . . . . . . 68
Vorzüge der Drehstrommotoren . . . . . . . . . . . . . . . 69
Entwurf und Berechnung von Mehrphasenmotoren . . . . . . . . . . . 70
Allgemeines . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 70
Der Magnetisierungsstrom . . . . . . . . . . . . . . . . . 70
Der Leerlaufstrom . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 71
Die Streuung . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 72

Seite
Der Arbeitsstrom . . . 75
Der resultierende Strom . . . 75
Der Leitungsfaktor . . . 75
Das Heylandsche Diagramm . . . 75
Die Messung der Streuungskoeffizienten . . . 76
Der maximale Leistungsfaktor . . . 77
Die Überlastungsfähigkeit . . . 78
Der Kurzschlussstrom . . . 79
Beispiel für die Berechnung . . . 80
Prüfung von Drehstrommotoren . . . 88
Einphasige Motoren . . . 92
Schaltungen der einphasigen Motoren . . . 92
Kunstphase . . . 93
Kondensator und Selbstinduktion . . . 93
Parallelschaltung der Phasen . . . 94
Hintereinanderschaltung der Phasen . . . 94
Betriebsverhältnisse . . . 96
Magnetisierungsstrom des Ständers . . . 96
Magnetisierungsstrom des Läufers . . . 96
Berechnung eines Einphasenmotors . . . 97
Prüfung von einphasigen Wechselstrommotoren . . . 100

Zweiter Hauptteil.

## Arbeitsübertragung.

Entwurf, Berechnung und Beschreibung elektrischer Arbeitsübertragung . . . 103
Allgemeines über Primärstationen . . . 103
Entwurf von Gleichstromübertragungen . . . 104
Hauptstromübertragungen . . . 104
Mehrleiterhauptstromübertragungen . . . 106
Kraftverteilung mit konstanter Spannung . . . 107
Kraftverteilungen mittelst Drehstrom . . . 110
Beschreibung ausgeführter Anlagen . . . 114
Elektrische Kraftverteilung von Chaux-de-Fonds und Locle . . . 115
Beschreibung der Primärstation in Combe-Garot . . . 116
Die Leitungen . . . 117
Die Verwendung des Stromes . . . 118
Umformerstation in Chaux-de-Fonds . . . 118
Centralstation von Brown, Boveri & Co. . . . 122
Beschreibung der Primärstation . . . 123
Elektrische Anlage . . . 123
Anlage der Saline Lüneburg . . . 125
Harzer Werke zu Rübeland . . . 128
Anlage der Spinnerei La Louisiane in Gent . . . 132
Die Kraftanlage an den Niagarafällen . . . 133
Beförderung von Schiffen auf Kanälen . . . 145
Beschreibung elektromotorischer Antriebe . . . 146
Ventilatoren und Exhaustoren . . . 146
Centrifugal- und Kolbenpumpen . . . 147
Hebezeuge . . . 150
Automatischer Wendeanlasser . . . 160
Werkzeugmaschinen . . . 164
Fahrbare Bohrmaschinen . . . 175
Gesteinsbohrmaschinen der Union-Elektrizitätsgesellschaft . . . 179
Gesteinsbohrmaschinen von Siemens & Halske . . . 181
Landwirtschaftliche Anlagen . . . 183
Rentabilität elektrischer Anlagen . . . 186
Schlusswort . . . 193

# Einleitung.

Die Wege, welche unsere elektrotechnische Industrie in den kommenden Jahren wandeln wird, sind andere als man vor etwa zehn Jahren noch annehmen durfte. Es besteht kein Zweifel, dass die Verwendung des elektrischen Stromes zur Lichterzeugung zurücktreten wird hinter der elektrischen Arbeitsübertragung. Letztere wird die Kultur des zwanzigsten Jahrhunderts in ähnlicher Weise beeinflussen, wie die Entwickelung der gesitteten Nationen im abgelaufenen Säkulum durch die Erkenntnis der Gesetze der mechanischen Wärmetheorie und ihre praktische Ausnutzung in der Dampfmaschine und dem Explosionsmotor begünstigt worden ist.

Dass heute schon der elektrische Motor die am sparsamsten arbeitende Maschine für Kräfte bis zu 100 Pferdestärken ist, wird von keiner Seite mehr angezweifelt. Der Unterschied zwischen indizierten uud effektiven Pferdestärken, also zwischen Energieverbrauch und Energieleistung, sein Wirkungsgrad, ist günstiger als bei irgend einer anderen Motorgattung. Die einfache Bedienung, der geringe Raumbedarf, die Seltenheit der Reparaturen, die stete Betriebsbereitschaft und last not least der geringe Anschaffungspreis sichern ihm die Zukunft.

Indessen muss noch eine Bedingung erfüllt sein, welcher noch nicht allerorts in gleichem Masse genügt wird; es muss der Strompreis ein möglichst geringer sein. Die Erzeugung des Stromes muss für hunderte von Elektromotoren gemeinsam in einer centralisierten Anlage mittelst grosser Dynamomaschinen geschehen. Dies wird das Ideal der Kraftübertragung sein, die wirkliche Kraftverteilung in weitem Umfange, die Überlandcentrale, welche den Segen des mechanischen Kleinbetriebes zugleich mit den Annehmlichkeiten des elektrischen Lichtes den kleinen Städten und Dörfern vermittelt.

Dem vorliegenden Bande des Handbuches ist die Aufgabe gestellt, den Leser in alle Einzelheiten der elektrischen Arbeitsübertragung einzuführen.

Es ist hier der Ort, dass wir uns darüber klar werden, was man unter elektrischer Arbeitsübertragung versteht und aus welchen Hauptteilen eine derartige Anlage sich zusammensetzt.

Der Ausdruck Arbeitsübertragung im allgemeinen Sinne wird gebraucht für jeden Vorgang, durch welchen eine Energiemenge von einer Stelle nach einer räumlich entfernten zweiten Stelle gebracht wird. In dieser Weise ist z. B. schon ein Zahnradpaar das Mittelglied einer Arbeitsübertragung, ebenso wie der Riemen oder die Seile zwischen treibender und getriebener Scheibe einen Energietransport ausführen.

Mit dem Begriff der elektrischen Arbeitsübertragung ist indessen ein bestimmter Vorgang eng verknüpft, der nicht fehlen darf, nämlich eine zwei-

fache Umwandelung einer Energieform in eine andere. Bei der elektrischen Arbeitsübertragung wird eine bestimmte Energiemenge, welche als mechanische Energie zur Verfügung steht, zunächst umgeformt in elektrische Energie, dann auf eine andere Stelle übertragen, und dort wird die elektrische Energie wiederum umgeformt in das, was sie auch zuerst gewesen, in die Form der mechanischen Energie.

Streng genommen ist jedes telephonische Gespräch, jede telegraphische Nachricht eine elektrische Arbeitsübertragung. Im ersteren Falle werden Luftschwingungen dadurch übertragen, dass sie für die Übertragung selbst in elektrische Energie umgewandelt sind; bei der Telegraphie ist es wirklich mechanische Energie, die im Geber und im Empfänger auftritt, während sie die Leitung in der Energieform der Elektrizität durchläuft.

Im prägnanten Sinne — und nur um diesen handelt es sich hier — verstehen wir aber unter elektrischer Arbeitsübertragung nur den Transport grösserer mechanischer Kräfte von einem Orte zu einem anderen, wobei die Entfernung durch elektrische Leitung überbrückt wird, welche die Energie in Form von Elektrizität überträgt.

Es ergiebt sich somit, dass bei einer elektrischen Arbeitsübertragung dreierlei scharf voneinander zu trennen ist, nämlich die Erzeugungsstelle der Kraft, welche gewöhnlich identisch ist mit der Stelle, an welcher die Umformung in elektrische Energie vorgenommen wird; ferner die von der Erzeugungs- und Umformungsstelle oft weit entfernte Anlage, in welcher die übertragene Kraft zur Verwendung gelangt; und schliesslich das Bindeglied zwischen beiden Stellen, das Übertragungsmittel, die elektrische Leitung.

Die Erzeugung der mechanischen Energie durch die Kraft des Wassers in Turbinen, durch die Kraft des Dampfes in Dampfmaschinen oder die Explosion von Gasen in Explosionsmotoren zu betrachten ist unsere Aufgabe nicht.

Ebenso dürfen wir uns auf den Hinweis beschränken, dass die Umformung mechanischer in elektrische Energie vermittelst Dynamomaschinen in Band III bis V des Handbuches eingehend gewürdigt ist, wenn es auch notwendig sein wird, an geeigneter Stelle einige speziell für unser Thema in Betracht kommende Details nachzutragen.

So werden wir denn darauf hingeleitet, bei der Behandlung unserer Aufgabe zwei grosse Hauptteile zu machen: wir werden zweckmässig zunächst die

Elektromotoren

und dann in einem zweiten Teil die

Elektrische Kraftübertragung und Kraftverteilung

behandeln.

Jeder dieser Hauptteile wird von selbst in drei Unterabteilungen zerfallen, da wir mit den drei Stromsystemen des Gleichstromes, des einphasigen und des mehrphasigen Wechselstromes zu rechnen haben.

Die einzelnen Unterabschnitte dieser Unterabteilungen werden sich aus den späteren Darlegungen selbst ergeben.

---

## Erster Hauptteil.

# Elektromotoren.

# A. Gleichstrom.

---

## Allgemeines.

Es ist in dem Teile des Handbuches, welcher über Dynamomaschinen handelt (Band III bis V) eingehend die Wirkungsweise der elektrischen Maschine auseinandergesetzt und bei dieser Gelegenheit gezeigt, wie eine elektrische Maschine zweckmässig als ein Verwandlungsapparat zu betrachten ist, welcher die in einer bestimmten Form ihm zugeführte Energie in eine andere Energieform überführt.

Führt man einer elektrischen Maschine mechanische Energie an ihrer Achse zu, so wird sie dieselbe, in elektrische Energie verwandelt, an den Klemmen wieder abgeben. Dies ist die Wirkungsweise der Dynamomaschine.

Führt man dagegen umgekehrt einer elektrischen Maschine die Energie in elektrischer Form zu, indem man ihre Anker- und Magnetwicklung an einen zweckentsprechenden Stromkreis legt, so wird sie diese elektrische Energie, in mechanische Energie verwandelt, an ihrer Achse abgeben.

Dies ist die Wirkungsweise des Elektromotors. Demnach ist klar, dass — wenigstens im allgemeinen und zumal beim Gleichstromsystem — ein Unterschied zwischen Dynamomaschine und Elektromotor nicht besteht, wie sich ja thatsächlich auch jede elektrische Gleichstrommaschine sowohl als Stromerzeuger wie auch als Motor verwenden lässt.

Wir dürfen daher diejenigen Beziehungen an Elektromotoren, welche sich auch an Dynamomaschinen wiederfinden, auf Grund der Darlegungen von Band III bis V, als bekannt voraussetzen und sind ferner mit Rücksicht auf die im ersten Teil dieses Bandes vorausgegangenen Ausführungen im stande, uns auf die speziellen Eigenschaften der Elektromotoren als Glieder einer Arbeitsübertragung zu beschränken.

## Magnetschaltungen.

Bei der Betrachtung der Gleichstrommotoren erscheint es vor allem zweckmässig, die verschiedenen Magnetschaltungen kennen zu lernen und ihre Vorzüge und Nachteile im praktischen Betriebe zu studieren.

## Der Nebenschlussmotor.

Der am meisten benutzte Gleichstrommotor ist der Nebenschlussmotor; er hat diese ausgedehnte Anwendung seinen vorzüglichen Eigenschaften zu verdanken (Fig. 1).

[illegible] Erwärmung bei [illegible]

[illegible] das magnetische [illegible] der Anker- [illegible] weniger geschickten [illegible]

[illegible] so wird die [illegible] bei konstanter [illegible] konstant bei [illegible] wenn [illegible] die Win- [illegible] = konst.

$$n = \frac{E \cdot 30 \cdot 10^8}{m_a \cdot N}$$

ist, so muss

$$n = \text{const}$$

sein, das heisst, der Nebenschlussmotor ändert seine Tourenzahl nicht, ob er nun leer oder belastet läuft.

Bei genauerer Untersuchung müsste man natürlich die entstehende Änderung der Feldstärke berücksichtigen, wie man auch bei exakter Rechnung $E$ nicht als Betriebsspannung, sondern als gegenelektromotorische Kraft zu betrachten hätte.

Wir werden indessen auf diese Beziehungen, vor allem auf das Thema der Ankerrückwirkung, noch später eingehend zu sprechen kommen. Jedenfalls haben selbst nur mittelgute und mittelgrosse Nebenschlussmotoren bei konstanter Betriebsspannung nicht mehr als $5\,^0/_0$ Tourenschwankung zwischen Leerlauf und Normallast.

Diese Gleichmässigkeit der Geschwindigkeit bei Belastungsschwankungen giebt dem Nebenschlussmotor seine grosse praktische Bedeutung, da die weitaus meisten Kraftkonsumstellen mit wechselndem Kraftbedarf arbeiten, an eine gewisse Tourenkonstanz aber gebunden sind.

Zudem geht er bei richtiger Bauart eben wegen der Konstanz seines Magnetfeldes mit guter Zugkraft an und erfüllt daher im weitestem Masse die Anforderungen der Praxis.

Störend ist freilich bei höheren Spannungen der Umstand, dass die Magnetbewicklung an der vollen Betriebsspannung liegt. Man hat dies früher, als Spannungen von 65, 110 und höchstens 220 Volt als normal galten, nicht in dem Masse empfunden als in neuerer Zeit, wo die Werkstatt mit der Massenherstellung von 440voltigen und 500voltigen Nebenschlussmotoren schon von 2 PS ab rechnen muss. Neue Anforderungen schaffen indessen neue Hilfsmittel — dieser Satz ist wohl nirgendwo so sehr berechtigt wie in der Elektrotechnik —.

Die Verwendung von sogenannten Vulkan-Asbestspulen an Stelle der früher gebräuchlichen Zinkkästen zur Aufwicklung des Magnetspulendrahtes, die Wahl einer runden oder wenigstens elliptischen Polform, daher auch einer leicht und ohne Gefahr zu wickelnder Spulenkastenform, die in neuester Zeit bedeutend verbesserte Umspinnung der Drähte, welche trotz guter Isolation den Durchmesser der Kupferseele nur geringfügig vergrössert, und vor allen Dingen die Erkenntnis von der Schädlichkeit der Unterbrechung von Nebenschlussstromkreisen und deren Verhütung durch eine besondere Schaltung der Anlasser haben den Erfolg gehabt, dass heute 500voltige Motoren mit Nebenschlusswicklung mit derselben Sicherheit gebaut werden können wie seiner Zeit solche von 220 Volt.

Man hat mehrfach in städtischen Centralen von $2 \times 220$ Volt geglaubt, den Fabrikanten besonders entgegenzukommen durch die Erlaubnis, dass, wenn schon die Anker der Motoren an die Aussenleiter gelegt werden müssten, die Nebenschlusswicklung doch mit 220 Volt gespeist werden dürfe. Wir vermuten, dass keine grössere Firma hiervon Gebrauch gemacht haben wird, denn wir werden im folgenden zeigen, dass die Lebensdauer eines derart angeschlossenen Motors entschieden geringer sein muss als die eines Motors, dessen Ankerspulen an der gleichen Spannung liegen.

Schon im Jahre 1892 gab FISCHER-HINNEN in der Maschinenfabrik OERLIKON und unabhängig von ihm im Jahre 1894 der Verfasser eine besondere Schaltung der Anlasswiderstände für Nebenschlussmotoren an.

Zum Anlaufenlassen eines Nebenschlussmotors ist ein sogenannter Vorschalte- oder Anlasswiderstand notwendig, dessen elektrischer Widerstand im allgemeinen

$$R = \frac{E}{J} \ .$$

ist, wenn $E$ die Betriebsspannung und $J$ diejenige Stromstärke des Motors ist, mit welcher er in Betrieb gesetzt werden soll. In den meisten Fällen nimmt man für $J$ die volle Normalstromstärke des Motors. —

Würde dieser Anlasswiderstand dem Motoranker nicht beim Anlaufen vorgeschaltet werden, so würde beim Einschalten die entstehende Stromstärke proportional dem Ankerwiderstand $R_a$ sein; da dieser letzterer aber stets sehr klein sein soll, so würde bei direktem Stromschluss der entstehende Strom eine für die Ankerwicklung des Motors gefährliche Grösse annehmen, jedenfalls 20 bis 50mal so gross sein als die normale. Der Anker würde infolgedessen entweder verbrennen oder so rapide anlaufen, dass Drahtbrüche die Folge sein würden.

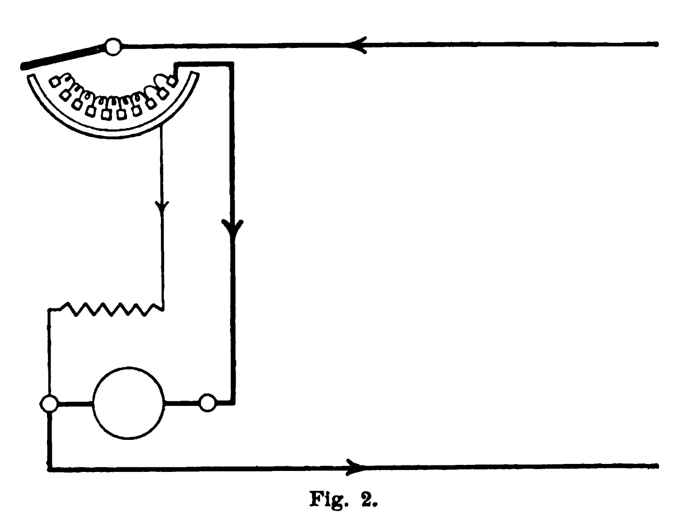


Fig. 2.

Die Schaltung des Anlaufwiderstandes war nun so gewählt, dass zunächst der Nebenschlussstromkreis geschlossen wurde, damit sich ein starkes Magnetfeld bildet. Dann wird auch der Anker unter Vorschaltung eines Anlasswiderstandes eingeschaltet und der Wert des letzteren langsam auf 0 reduziert, damit der Motor nach und nach seine volle Tourenzahl annahm.

Schaltete man einen solchen in Fig. 2 angedeuteten Anlasser zum Zweck der Ausserbetriebsetzung des Motors aus, so wurde erst der Ankerstromkreis (und zwar bei schneller Hebelbewegung ziemlich funkenlos) und dann zum Schluss der Magnetstromkreis unter heftiger Funkenerscheinung unterbrochen.

Der in voller Rotation begriffene und eine der zugeführten Betriebsspannung fast gleiche gegenelektromotorische Kraft erzeugende Anker bietet deshalb keinen Anlass zu einem Unterbrechungsfunken, weil durch das schnelle Vorschalten des gesamten Anlasswiderstandes die Stromstärke thatsächlich auf Null reduziert wird. Die heftige Selbstinduktion des Magnetstromkreises aber bietet bei Unterbrechung desselben den Anlass zur Erzeugung einer fabelhaft hohen Induktionsspannung, über deren Grösse man sich gewöhnlich keine Rechenschaft ablegt; diese Induktionsspannung kann leicht den zehnfachen Betrag der normalen Betriebsspannung annehmen und

in kurzer Zeit die Zerstörung der Spulenisolation und Durchschlagen der Wicklungen gegeneinander oder gegen den Körper zur Folge haben.

Es war unvermeidlich, als die Gebrauchsspannung in elektrischen Gleichstromanlagen mit Rücksicht auf die zunehmende räumliche Ausdehnung des Versorgungsgebietes gesteigert wurde, als Elektromotoren von 440 Volt Betriebsspannungen anfingeu, normal zu werden, dass man nach einem Mittel suchen musste, die schädliche Wirkung der Selbstinduktion in den Magnetspulen aufzuheben. Dies ist natürlich vollständig nur möglich, wenn beim Ausschalten des Motors eine Unterbrechung des Magnetstromkreises, also der Anlass zur Entstehung der Selbstinduktionsspannung, nicht stattfindet. Hierzu dient eine einfache Änderung des früheren Schaltungsschemas, welche ausserdem noch den Vorteil hat, die Konstruktion des Anlasswiderstandes zu vereinfachen. Die Anordnung geht aus beistehender Skizze hervor (Fig. 3). Der Magnetstrom wird gleichzeitig mit dem Ankerstrom eingeschaltet, da der Anfang der Magnetspulenwicklung an dem ersten Kontakt des Anlassers liegt. Es kann ohne Frage gegen diese Schaltung der Einwand erhoben werden, dass das magnetische Feld im Augenblick des Einschaltens nicht so kräftig ist, der Motor daher nicht so ruhig und mit so starker Zugkraft anläuft als bei der früheren Schaltung. Doch kann man dem entgegenhalten, dass dann sicher bei der Weiterbewegung des Hebels auf den zweiten Kontakt inzwischen das Feld genügend kräftig geworden sein muss. Für praktische Zwecke ist indessen thatsächlich ein Unterschied in der Anlaufskraft nicht bemerkbar. — Die obige einfache Schaltung hat aber zur Folge, dass bei ganz eingerücktem Anlasser der Widerstand des Magnetstromkreises um den Betrag des Widerstandes des Anlassers erhöht, also die Stromstärke im Nebenschluss verringert und die Tourenzahl des Elektromotors gesteigert wird. Es wäre ja nun sehr einfach, den Anlasser wie nebenstehend (Fig. 4) so auszuführen, dass der Hebel in der Endstellung noch einen Kontakt berührt, welcher mit dem Anfangskontakt verbunden ist. Dadurch würde der Betrag des Widerstandes des Anlassers in der Betriebsstellung wieder eliminiert.

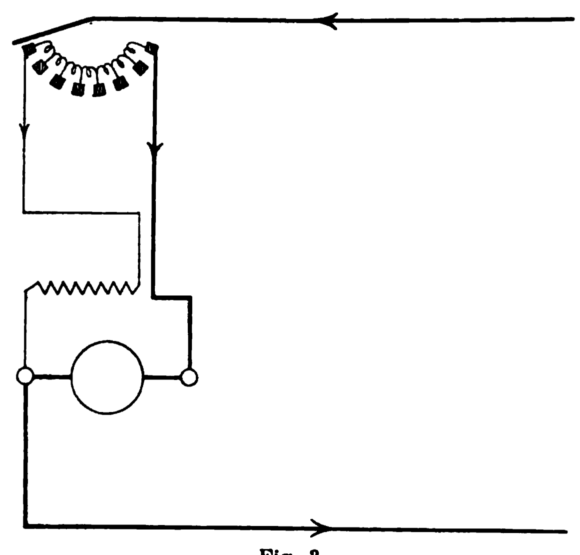


Fig. 3.

Indessen ist das nicht nötig, wie folgende Überlegung zeigt. Bei guten Motoren mittlerer Grösse beträgt der Nebenschlussstrom etwa 3 % des Hauptstromes, also

$$J_n = \frac{J_a}{33},$$

demzufolge ist der Widerstand der Magnetbewicklung

$$R_n = 33 \cdot \frac{E}{J_a}.$$

Der Anlasswiderstand wird aber, wie weiter oben ausgeführt, zweckmässig so dimensioniert, dass bereits auf dem ersten Kontakt etwa die volle Betriebsstärke im Anker entsteht; daher muss der Widerstand des Anlassers

$$R_a = \frac{E}{J_a}$$

sein.

Es ist ersichtlich, dass die Magnetspulenbewicklung daher einen 33 mal so grossen Widerstand als der Anlasser besitzt; die Erhöhung der Tourenzahl durch die Erhöhung des Spulenwiderstandes im Verhältnis 33 : 34 ist für die Praxis unmerklich.

Diese Schaltung der Anlassapparate für Gleichstrommotoren dürfte deshalb wohl zur Zeit von allen grösseren Firmen adoptiert worden sein. Ihr Vorzug besteht eben darin, dass beim plötzlichen Ausschalten des Anlasser-

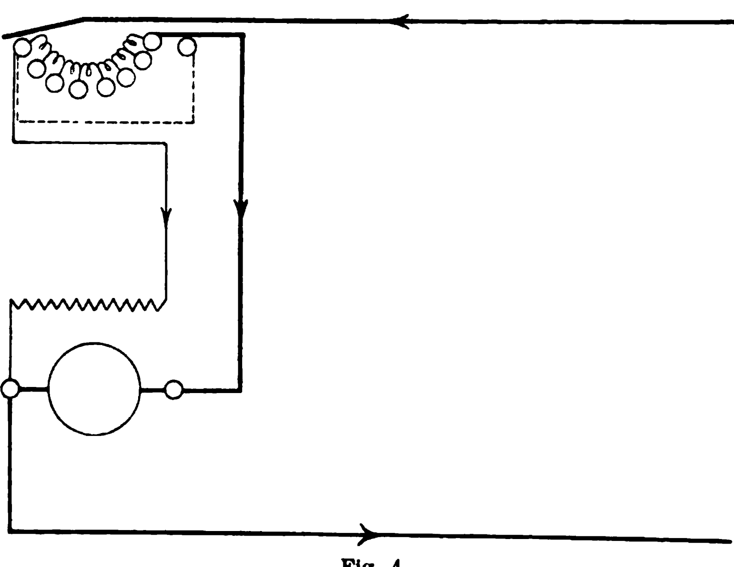


Fig. 4.

hebels die Magnetwicklung nicht unterbrochen wird, da der Anker, die Magnete und der Anlasser dann hintereinander einen geschlossenen Stromkreis bilden.

Zurückgreifend auf das früher Gesagte ist eine derartige Schaltung aber nicht möglich, wenn die Spannung, mit welcher die Magnete gespeist werden, verschieden ist von der Betriebsspannung des Ankers, wie dies also der Fall ist in Dreileiteranlagen, wenn die Magnete vom Mittelleiter aus erregt werden.

Abgesehen von der Unbequemlichkeit, alle drei Leiter in die Anlage einführen zu müssen, ist der Vorteil geringerer Spannung in den Magneten nur scheinbar; denn die Selbstinduktionsspannung, welche nun beim Ausschalten unvermeidlich ist, wirkt sicher auf die Dauer schädlicher auf die Isolation der Drahtwindungen als der dauernde Betrieb der Spulen mit der Spannung der Aussenleiter, aber ohne die Gefahr der Selbstinduktion.

Wenn immer möglich sollten indessen die Verwaltungen der Centralen, welche mit Gleichstrom betrieben werden, allzuhohe Anforderungen an die

Industrie nicht stellen. Die in Deutschland in den letzten Jahren gebauten Centralen für 2 $\times$ 220 Volt Gleichstrom lassen mit wenigen Ausnahmen den Anschluss einpferdiger Motoren mit 220 Volt noch zu. Es ist dies im Interesse der Centrale selbst; denn einpferdige 440 Volt-Motoren haben bereits auf Anker und Spulen so ausserordentlich dünne Drähte, dass ihre Herstellung bei genügender Betriebssicherheit unverhältnismässig teuer wird, so dass hier also einer minderwertigen billigen Fabrikation Thür und Thor geöffnet wird zum Schaden des Publikums und der Centrale selber. —

Während der Nebenschlussmotor, wie wir weiter oben gesehen haben, bei konstanter Betriebsspannung seine Geschwindigkeit selbst bei schwankender Belastung nicht wesentlich ändert, ist er erforderlichen Falles in seiner Tourenzahl sehr leicht und bei entsprechender Bauart in weiten Grenzen regulierbar, eine Anforderung, die von der Praxis oft gestellt wird.

Wir wollen an dieser Stelle nur die einfachste Methode betrachten, wie die Tourenzahl eines Nebenschlussmotors geändert werden kann. Die Tourenzahl $n$ ist umgekehrt proportional $m_a$ der Ankerwindungszahl, proportional $E$ der Betriebsspannung (genauer der gegenelektromotorischen Kraft) und umgekehrt proportional der totalen Kraftlinienzahl $N$, also

$$n \sim \frac{E}{N \cdot m_a}.$$

Es soll natürlich $E$ und $m_a$ konstant sein, also müssen wir $N$ ändern. Dies geschieht durch Änderung der Zahl der Ampèrewindungen des Magnetkreises, also durch Änderung des Nebenschlussstromes $J_n$.

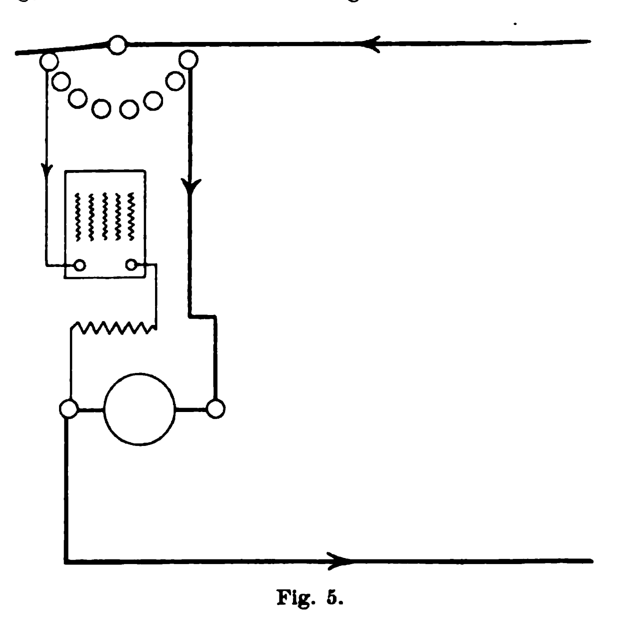


Fig. 5.

Zu diesem Zweck schaltet man in den Stromkreis der Magnetwicklung einen regulierbaren Widerstand (Nebenschlussregulator), welcher zur Vorsicht so auszuführen ist, dass man durch ihn nicht etwa den Stromkreis unterbrechen kann (Fig. 5).

Man kann nun, ausgehend von derjenigen Stellung des Regulatorhebels, in welcher der Regulator kurzgeschlossen ist, durch allmähliches Einschalten von Widerstandsspiralen den Nebenschlussstrom $J_n$ verringern und damit die Tourenzahl $n$ erhöhen. Dies hat natürlich in dem Augenblick seine Grenze, wo der Motor wegen des bald eintretenden Übergewichtes der Ankerampèrewindungen über die Feldampèrewindungen zu funken beginnt; diese Grenze lässt sich aber ziemlich weit hinausschieben, so dass man einem gut dimensionierten Motor wohl zumuten darf, mit der doppelten Tourenzahl zu laufen, wenn anders seine mechanische Konstruktion dies zulässt (Ankerbandagen, Umfangsgeschwindigkeit).

Indessen sind die Anforderungen in der Praxis im allgemeinen hiermit nicht erledigt. Die Fälle, in welchen von einem Elektromotor verlangt wird, dass man seine Tourenzahl um eine bestimmte Grösse verändern kann, sind an und für sich selten. In den gewöhnlichen Fällen wird der Elektromotor stets seine konstante Umdrehungszahl machen können und es wird im Gegenteil darauf ankommen, dass er sie macht. Wird aber eine Regulierung verlangt, so wird gewöhnlich nicht die Regulierung innerhalb der Grenze 1 : 2 gewählt, sondern eine erheblich grössere Geschwindigkeitsänderung verlangt. So ist es z. B. der Fall, wenn es sich um Einzelantrieb von Werkzeugmaschinen oder Arbeitsmaschinen im Buchdruckergewerbe und ferner um den Antrieb von Maschinen für die Papierfabrikation handelt. Alle diese Maschinen, welche man früher von einer Transmission aus antrieb und bei welchen die allerdings notwendige Geschwindigkeitsveränderung durch Stufenscheiben, auswechselbare Zahnradvorgelege oder konische Vorgelege bewirkt wurde, treibt man neuerdings mit Elektromotoren und verlangt nun natürlich, dass der Elektromotor in seiner Eigenart nicht nur der Ersatz für die Kraftquelle, sondern auch vermöge seiner Regulierfähigkeit der Ersatz mit für die Reguliermechanismen sein soll. Hierbei kommen aber in den meisten Fällen ganz andere Geschwindigkeitsveränderungen vor, als wie wir sie soeben als möglich kennen gelernt haben. Wir haben soeben gesehen, dass ein guter Elektromotor mit Nebenschlusswicklung durch einen einfachen Nebenschlussregulator in seiner Tourenzahl auf das Doppelte gebracht werden kann. Damit ist indessen der Praxis des Buchdruckergewerbes, vor allen Dingen aber dem Werkzeugmaschinenbau und den mannigfachen anderen Anwendungsarten von Arbeitsmaschinen nicht gedient. Es ist dem Verfasser vorgekommen, dass die Anforderung einer Tourenregulierung im Verhältnis von 1 : 10 an ihn gestellt wurde; in einem Falle — es handelt sich da um den Antrieb von Kattundruckmaschinen, sogenannten Kalandern — wünschte man sogar eine Tourenveränderung von 1 : 20. Wie die Elektrotechnik derartigen Aufgaben gegenüber zu handeln hat, werden wir in einem späteren Abschnitte sehen und wollen wir nur andeuten, dass auch derartige Aufgaben durch Motoren mit zwei Kollektoren und durch die Anwendung von Dreileitersystemen gelöst werden können.

Es liegt nahe, nachdem wir den Nebenschlusselektromotor betrachtet haben in seiner Wirkungsweise unter der Voraussetzung, dass die ihm zugeführte Spannung eine stets gleichbleibende ist, sich seine Wirkungsweise zu vergegenwärtigen auch unter der in der Praxis wohl immer vorhandenen Bedingung, dass seine Spannung nicht ganz gleichbleibend ist. Die grossen Centralstationen, welche Gleichstrom zur Verfügung ihrer Abnehmer abgeben, bemühen sich ja allerdings ängstlich, die Spannung nicht in der Centralstation, sondern möglichst am Verbrauchsorte konstant zu halten, indessen hat man doch in den Verteilungsleitungen und sogar in den Hausanschlüssen mit Spannungsverlusten zu rechnen, welche sich jeder Kontrolle seitens der Centrale entziehen. Daher kommt es nicht selten, dass die Spannung an dem stromverbrauchenden Gegenstand, hier also an dem Elektromotor, um 5 bis 10 % schwankt, gewöhnlich allerdings nur aus dem einfachen Grunde, weil der Elektromotor selber in seiner Belastung schwankt. Viel unangenehmer indessen ist die Spannungsschwankung bei Strassenbahnen, und da in den letzten Jahren eine ganze Anzahl von elektrischen Strassenbahnen angefangen haben, ausser ihrer eigensten Thätigkeit als Verkehrsmittel, auch noch aus

ihren Leitungsnetzen Strom abzugeben an Private, zum Elektromotorenbetrieb, so ist es wohl notwendig, sich zu vergegenwärtigen, was ein Elektromotor mit Nebenschlussbewicklung thut, wenn er mit einer verhältnismässig schwankenden Spannung angetrieben wird. Bekanntlich beträgt die Spannung der meisten Strassenbahnen am Schaltbrett der Centrale 550 Volt; durch die ausserordentliche Schwankung der Stromstärke in den Leitungen, welche hier eine Folge ist des schwankenden Kraftbedarfes der einzelnen Strassenbahnwagen beim Anfahren, Thalfahren, Bergfahren u. s. w., entsteht bei einigermassen grosser Entfernung von der Centrale ein bedeutender Spannungsverlust und zwar eben dieser Schwankung wegen eine bedeutende Spannungsschwankung. So ist es z. B. unter normalen Verhältnissen ganz gut möglich, dass bei einem, an ein Strassenbahnnetz angeschlossenen Motor die Spannung an seinen Klemmen um 15 bis 20% schwanken kann. Es fragt sich nun, wie verhält sich der Nebenschlussmotor gegenüber dieser Schwankung.

Wäre das magnetische Feld des Elektromotors ein konstantes, so würde es klar sein, dass seine Tourenzahl der zugeführten Spannung einfach proportional ist. Er würde dann genau um soviel Prozent in der Tourenzahl schwanken, wie die ihm zugeführte Spannung in ihrer Höhe schwankt. Glücklicherweise ist indessen sein magnetisches Feld kein konstantes. Die Schaltung der Nebenschlusswicklung hat ja zur Folge, dass die Stromstärke in der Magnetentwickelung ebenfalls abhängig ist, und zwar einfach proportional von der zugeführten Spannung. Es wird daher die Stromstärke in der Magnetbewicklung im selben Verhältnisse schwanken, wie die Spannung, mit welcher der Motor läuft. Die Folge hiervon ist, dass die Ampèrewindungszahl des Motors genau wie die Netzspannung schwankt und daher muss auch das magnetische Feld des Motors ein schwankendes sein. Nun wissen wir, aus den Magnetisierungskurven von Gusseisen und Stahlguss, dass innerhalb gewisser Grenzen von Ampèrewindungszahlen die magnetische Dichte ziemlich proportional ist der magnetomotorischen Kraft. Nehmen wir nun einmal an, dass die Konstruktion eines Elektromotors mit Nebenschlusswicklung so gewählt sei, dass bei schwankender Spannung sein Magnetkörper innerhalb derjenigen Grenze magnetisch beansprucht würde, innerhalb welcher Proportionalität zwischen magnetomotorischer Kraft und magnetischer Dichte vorhanden ist, so könnten wir von diesem Motor sagen, er ändert sein magnetisches Feld genau, wie sich die ihm zugeführte Spannung ändert; natürlich innerhalb der angenommenen Grenzen. Ein Motor, dessen magnetisches Feld wir schwächen, läuft proportional schneller. Aus dieser Überlegung können wir uns jetzt bereits klar machen, dass es bei richtiger Wahl aller Verhältnisse theoretisch möglich erscheint, einen Motor zu bauen, welcher innerhalb gewisser Grenzen gegen die Schwankung der Spannung in seiner Tourenzahl unempfindlich ist. Um es zunächst noch allgemein auszudrücken, müsste ja bei sinkender Spannung der Motor langsamer laufen; da aber auch sein magnetisches Feld proportional geschwächt wird, so muss er aus diesem Grunde eigentlich schneller laufen. Beide Forderungen heben sich vollständig auf und der Motor behält seine Tourenzahl trotz der Spannungsschwankung bei.

Der Verfasser hatte vor etwa Jahresfrist Gelegenheit, eine derartige Aufgabe durchzuführen. Es handelte sich darum, für die technische Hochschule in Hannover eine Betriebskraft zu Versuchszwecken im Laboratorium

zu schaffen. Gasmotore oder Dampfmaschinen sollten nicht angewandt werden; es blieb daher nur übrig, da man auch davon absah, einen Motor mit Anschluss an das Netz der städtischen Centrale in Hannover aufzustellen, einen Nebenschlussmotor an das vor der technischen Hochschule gerade vorbeiführende Netz der Strassenbahn Hannover anzulegen.

Hierbei kam aber zur Sprache, dass die ausserordentliche Spannungsschwankung, von 550 Volt auf 450 Volt, den Betrieb des Motors sehr stören würde und zwar um so mehr, als mit dem Motor ja andere Dynamomaschinen zu Versuchszwecken angetrieben werden sollten und hierbei eine konstante Tourenzahl Voraussetzung war.

Es wurde daher von Seiten des Leiters des elektrotechnischen Instituts, des Herrn Geheimrat Professor Dr. KOHLRAUSCH vorgeschrieben, dass dieser Motor von 25 effektiven Pferdekräften so gebaut sein müsse, dass eine Einwirkung der Spannungsschwankung auf den Motor sich höchstens in einer Tourenveränderung von 1 bis 2% bemerkbar machte.[1]

Ein für die Praxis eines jeden Maschinenbetriebes notwendiges Erfordernis besteht darin, dass man irgendwelche Maschinen oder sonstige Apparate in ihrer Drehrichtung verändern kann.

Es ist notwendig, Aufzüge aufwärts und abwärts laufen zu lassen; es ist notwendig, Fahrzeuge vorwärts und rückwärts fahren lassen zu können, beim Betrieb von Kränen und Hebezeugen jeder Art ist die Möglichkeit der Drehrichtungsveränderung einfach eine [illegible]. Nun ist es aus der Lehre über die Erzeugung des elektrischen Stromes mittels Dynamomaschinen in einem früheren Bande des Handbuches klar, dass sich die Drehrichtung eines Elektromotors ausserordentlich leicht ändern lässt. Es ist hierzu nur notwendig, die Richtung der durch den Anker gehenden magnetischen Kraftlinien umzukehren, oder mit anderen Worten, die Polarität der Magnetpole zu vertauschen derart, dass der bisherige Nordpol Südpol und der bisherige Südpol Nordpol wird. Dabei ist natürlich das einzige Mittel, die Umkehr der Stromrichtung in der Magnetwicklung. Die Stromrichtung im Anker muss natürlich dieselbe bleiben wie vorher.

Indessen kann man es auch auf eine andere Weise ermöglichen, die Drehrichtung des Elektromotors zu verändern; man verändert die Stromrichtung im Anker, während man die Stromrichtung in der Magnetwicklung nicht verändert. Wir können also ganz allgemein sagen, dass ein Elektromotor seine Drehrichtung ändert, wenn die Stromrichtung entweder im Anker oder in der Nebenschlusswicklung geändert wird. Eine gleichzeitige Änderung der Stromrichtung sowohl im Anker als auch in der Magnetwicklung würde keinen Erfolg haben, der Elektromotor würde seine Drehrichtung keineswegs ändern. [illegible] bekanntlich die [illegible] Weise [illegible] man [illegible] sagte, dass [illegible] Elektromotor [illegible] seine [illegible] unverändert beibehält, [illegible] Stromrichtung im Anker und in den Magneten vertauscht [illegible] [illegible] ganz befriedigend

[1] [illegible] Motor [illegible]

[illegible] Konigen Frankf[illegible] [illegible] worden und [illegible] die übrigen F[illegible]

laufen muss, wenn er mit Wechselstrom gespeist wird. Noch heute sind bekanntlich derartige Wechselstrommotoren, allerdings mit Hauptstromwicklung der Magnete und mit unterteilten Magnetkernmassen überall da im Betriebe, wo Wechselstrommotoren für **hohe Anzugskraft** notwendig sind.

So leicht es nun im ersten Augenblicke erscheint, in der besprochenen Weise die Drehrichtung eines Elektromotors zu verändern, so schwierig sind die diesem Zwecke dienenden Apparate zu konstruieren. Wie wir oben gesehen haben, braucht ein jeder Motor einen Vorschaltwiderstand zum langsamen Anlaufen. Es wäre ja ziemlich einfach, bei Motoren mit wechselnder Drehrichtung die Schaltung so vorzunehmen, dass man den gewöhnlichen

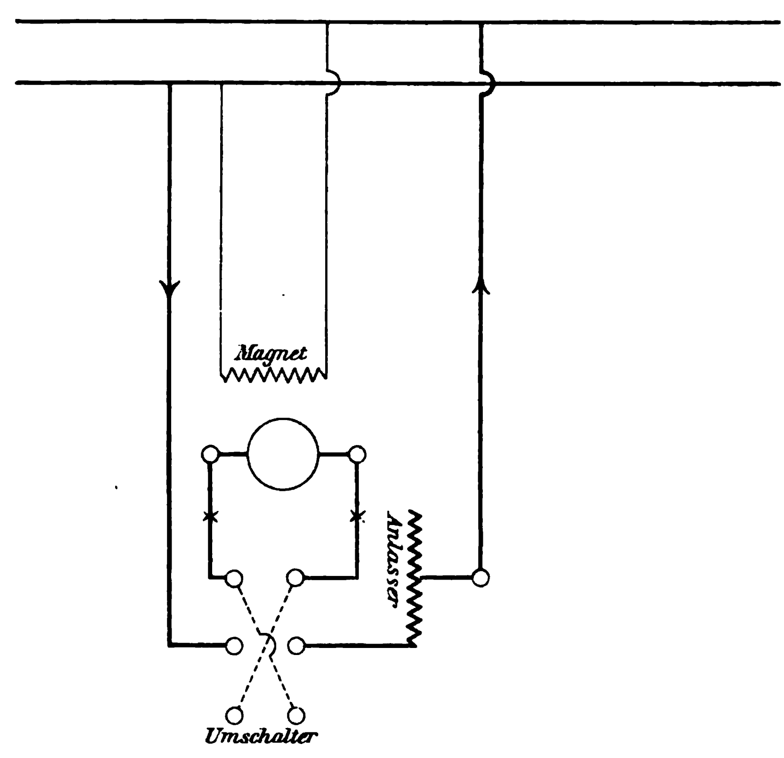



Fig. 6.

Anlasswiderstand beibehält, die Magnetwicklung direkt an das Netz legt und dann durch einen doppelpoligen Umschalter die Stromrichtung im Anker oder in der Magnetwicklung ändert (Fig. 6).

Es ist nun aber selbstverständlich notwendig, ehe man dieses Umschaltungsmanöver macht, den Elektromotor still zu setzen, das heisst, den Anlasswiderstand auszurücken. Man sieht deshalb gleich ein, dass ein solches Verfahren nach obenstehender Figur die Gefahr einer Zerstörung des Motors nahe legt, da es recht wohl denkbar ist, dass ein unbesonnener Maschinist den Hebel des Umschalters auf die andere Drehrichtung umlegt, ehe er den Motor still gesetzt, beziehungsweise den Anlasswiderstand ausgerückt hat. Es ist deshalb ohne allen Zweifel eine Notwendigkeit, die beiden Bewegungen der Stromschaltung und des Anlassens und Ausrückens des Vorschaltwider-

standes zwangläufig miteinander zu verbinden, dergestalt, dass eigentlich ein doppelter Anlasswiderstand mit der doppelten Anzahl von Kontakten entsteht, bei welchen der Nullpunkt, gleichbedeutend mit dem Stillstand des Motors sich in der Mitte der Kontakte befindet und bei dessen Schaltung eine derartige Anordnung getroffen ist, dass die Bewegung des Anlasserhebels nach links eine Rotation des Motors nach links hervorbringt, während die Bewegung des Anlasserhebels nach rechts die Drehung des Motors nach rechts zur Folge hat.

Fast allen diesen Umkehranlasswiderständen ist das eine Prinzip gemeinsam, dass die Umschaltung des Magnetstromes möglichst funkenlos geschehen soll. In welch höherem oder geringerem Masse die einzelnen Konstruktionen dieser Aufgabe gerecht geworden sind, lassen wir dahingestellt, umsomehr als wir später noch Gelegenheit haben werden, uns bei der Besprechung von Elektromotoren für Kräne und Aufzüge über diese Art von Umkehranlasswiderständen zu verbreiten.

Nachdem wir nun in dieser Weise uns Rechenschaft abgelegt haben über die Wirkungsweise und die hervorstehendsten Eigenschaften des Gleichstrommotors mit Nebenschlusswicklung, gehen wir über zu einer anderen Art von Gleichstrommotoren, nämlich zu den

## Hauptstrommotoren.

Diese Motore sind so genannt entsprechend ihrer Schaltung, zufolge welcher der Hauptstrom die Ankerwicklung und die Magnetwicklung hintereinander durchläuft. Die Stromstärke in der Magnetwicklung ist deshalb — abgesehen von irgend welchen Regulatoren, auf welche wir später zu sprechen kommen — genau gleich der Stromstärke in der Ankerwicklung. Es ist deshalb von vornherein ein sehr wichtiges Moment bei den Hauptstrommotoren zu berücksichtigen, das nämlich die Magnetstromstärke und damit also die Stärke des magnetischen Feldes proportional ist der Ankerstromstärke, das heisst, der augenblicklichen Belastung des Motors. Der Nebenschlussmotor hatte, wie wir gesehen haben, bei konstanter Spannung ein konstantes Magnetfeld; der Hauptstrommotor hat trotz konstanter Spannung, mit welcher wir ihn uns zunächst betrieben denken, ein wechselndes Magnetfeld, sobald er seine Belastung wechselt.

Machen wir uns von vornherein klar, was bei konstanter Spannung ein wechselndes Magnetfeld zu bedeuten hat. Ein in seiner Stärke wechselndes Magnetfeld hat natürlich eine entsprechende ab- und zunehmende Geschwindigkeit des Motors zur Folge. Ist der Motor voll belastet, so wird er seine normale Tourenzahl machen, da in diesem Falle die normale Stromstärke in der Magnetwicklung vorhanden und daher die Stärke des magnetischen Feldes auch normal ist.

Wird der Motor nun aber etwas schwächer belastet, so wird das Magnetfeld schwächer und daher seine Tourenzahl bedeutend höher, und sollte der unglückliche Zufall bei einem Hauptstrommotor eintreten, dass er plötzlich ganz entlastet wird, wie es ja beim Herunterfliegen eines Riemens passieren kann, so steigert sich ohne alle Frage seine Tourenzahl derartig, dass er in Stücke fliegt.

Ziehen wir hieraus die Konsequenzen, so werden wir einsehen, dass Hauptstrommotore mit Sicherheit nur da anwendbar sind, wo eine Belastungs-

schwankung möglichst ausgeschlossen ist oder wo wenigstens die Unterschreitung einer bestimmten Belastuug nicht vorkommt.

Daher eignet sich der Hauptstrommotor jedenfalls für den Antrieb von Ventilatoren und Exhaustoren, sobald man die Vorsicht gebraucht, ihn direkt mit diesen Maschinen zu kuppeln, also keinen Riemenantrieb anwendet. Er eignet sich in gleicher Weise zum Antrieb von Aufzügen und von Kränen und hat in dieser Verwendungsart Grosses geleistet. Sein hauptsächlichstes Anwendungsgebiet ist und bleibt der elektrische Strassenbahnbetrieb, bei welchem der Hauptstrommotor gerade wegen der selbstthätigen Regulierung seiner Tourenzahl durch die schwankende Belastung eine sehr angenehme Maschine ist. So kommt es, dass der Strassenbahnwagen ohne einen Handgriff des Führers bei Steigungen langsamer läuft, weil der Hauptstrommotor bei stärkerer Belastung langsamer laufen muss.

Der Hauptgrund indessen, welcher den Hauptstrommotor für die Verwendung gerade bei Strassenbahnwagen, Kränen, Aufzügen u. s. w. geeignet erscheinen lässt, ist seine ausserordentlich hohe Anzugskraft. Wenn es sich darum handelt, ruhende und schwer in Gang zu bringende Massen in Bewegung zu setzen, so wird in solchem Falle ein jeder Motor im Augenblick des Anlaufens stark überansprucht. Es ist nun die Zugkraft eines Elektromotors nicht nur abhängig von der Stromstärke des Ankers, sondern auch natürlich von der Stärke des magnetischen Feldes. Stellen wir uns daher vor, dass ein Nebenschlussmotor beim Inbetriebsetzen schwerer Massen mit der doppelten Stromstärke des Ankers beansprucht wird, als er normal leistet, so wird er ohne Frage die doppelte Zugkraft ausüben. Sein Magnetfeld hat ja dieselbe Stärke beibehalten.

Wird aber der Hauptstrommotor mit der doppelten Stromstärke beansprucht, so leistet er erheblich mehr, als die doppelte Zugkraft; nicht nur die Stromstärke im Anker ist die doppelte geworden, es ist auch die Stärke seines Magnetfeldes ganz erheblich gewachsen, da auch der Strom in der Magnetbewicklung der doppelte geworden ist. Es ist allerdings nicht etwa daraus zu folgern, dass die Stärke seines magnetischen Feldes die doppelte geworden ist, weil die Stromstärke in der Magnetwicklung die doppelte ist; bekanntlich geht aus den Magnetisierungskurven von Gusseisen und Stahlguss hervor, dass nur innerhalb gewisser Grenzen die magnetomotorische Kraft proportional ist der magnetischen Dichte. Immerhin wird aber jedenfalls ein bedeutend stärkeres Magnetfeld erzielt werden und wird daher der Hauptstrommotor vor einem Nebenschlussmotor vermöge seiner höheren Anzugskraft jederzeit da den Vorzug verdienen, wo ein Durchgehen des Motors durch etwaige vollständige Entlastung desselben ausgeschlossen ist und auf konstante Tourenzahl kein Wert gelegt wird.

Alle diese Bemerkungen über den Hauptstrommotor beziehen sich naturgemäss darauf, dass er an einer konstanten Spannung angeschlossen ist.

Man hat nun aber schon vor langen Jahren mit Erfolg versucht, den Hauptstrommotor nicht an eine Stromquelle von konstanter Spannung anzuschliessen, also nicht an eine Nebenschlussdynamo, Compounddynamo oder Akkumulatorenbatterie, sondern man hat durch Anwendung einer Hauptstromdynamo, deren Schaltung diejenige des Elektromotors genau entspricht, es verstanden, eine elektrische Kraftübertragung zusammenzustellen, bei welcher der Elektromotor alle seine Vorzüge in Bezug auf die hohe Anlaufskraft geltend machen kann ohne noch den Nachteil der Tourenschwankung bei

wechselnder Belastung zu besitzen. Die Hauptstromkraftübertragung besteht demnach aus zwei zusammengehörigen gleichgrossen elektrischen Maschinen, welche gewöhnlich vollständig gleich gebaut und gleich gewickelt sind. Es ist allerdings unmöglich, mit einer Hauptstromdynamo mehrere Hauptstrommotoren zu treiben: denn dann würden wieder die Nachteile der Tourenschwankung bei den Elektromotoren auftreten. Die Hauptstromkraftübertragung arbeitet in der Weise, dass zum Beispiel bei reinem Leerlauf des Elektromotors eine ausserordentlich geringe Spannung vorhanden ist. Denn auch die Hauptstromdynamo ist ja in ihrem magnetischen Felde abhängig von der Belastung und kann somit bei Leerlauf des Elektromotors, daher also bei einer verhältnismässig geringen Stromstärke auch nur eine geringe Spannung hervorbringen. Je mehr die Belastung des Elektromotors zunimmt, desto mehr steigt die Stromstärke und mit der Stromstärke die Spannung, bis endlich bei voller Belastung des Elektromotors Spannung und Stromstärke den zu Grunde gelegten Wert zeigen. Die Tourenzahl des Elektromotors ändert sich nicht, abgesehen etwa von dem Einfluss, welchen der Spannungsverlust in einer langen Leistung darauf ausübt.

In dem Handbuch von Fischer-Hinnen, vierte Auflage, ist auf Seite 85 bis 87 auseinandergesetzt, „welche Punkte bei der Berechnung einer derartigen sogenannten Hauptstromkraftübertragung zu beobachten sind". In der That lässt sich bei einiger Übung unter der Voraussetzung konstanter Tourenzahl der Dynamomaschine selbst bei langen verlustreichen Fernleitungen eine vollständig konstante Tourenzahl des Elektromotors bei allen Belastungen erreichen. Derartige in der Praxis ausgeführte Anlagen werden wir in einem der späteren beschreibenden Kapiteln kennen lernen.

Der Hauptstrommotor bedarf natürlich, wenigstens wenn er an eine Stromquelle von konstanter Spannung angeschlossen ist, ebenfalls eines Anlasswiderstandes. Dieser Anlasswiderstand hat natürlich nicht, wie der Anlasswiderstand eines Nebenschlussmotors, drei Klemmen, sondern nur zwei Klemmen, da er ja nichts weiter als ein ganz gewöhnlicher Vorschaltewiderstand ist (Fig. 7).

Wird der Hauptstrommotor betrieben von einer Hauptstromdynamo, so ist die Anwendung eines Vorschaltwiderstandes nicht unbedingt notwendig, wohl aber immerhin empfehlenswert. Es ist nämlich möglich, ohne einen Vorschaltwiderstand, eine Hauptstromkraftübertragung anstandslos und ohne Erreichung allzuhoher Stromstärke in Betrieb zu bringen, wenn man die stromerzeugende Dynamomaschine langsam anlaufen lässt. Im gleichen Momente fängt auch der zugehörige Elektromotor an, langsam anzulaufen: man steigert dann allmählich die Tourenzahl der Dynamomaschine bis auf das Maximum; der Motor läuft in gleicher Weise auf seine Tourenzahl hinauf.

Ausser den angeführten Vorzügen des Hauptstrommotors, dass er nämlich eine bedeutend höhere Anzugskraft besitzt als der Nebenschlussmotor, ist noch ein zweiter Vorzug zu nennen, ein Vorzug, der noch vor wenigen Jahren, als man noch nicht in der Lage war, Drehstromkraftübertragungen zu bauen, vielfach bestimmend dafür war, Hochspannungskraftübertragungen auf grössere Entfernungen hin unter Verwendung des Hauptstromsystems auszuführen. Es ist oben bei der Besprechung des Nebenschlussmotors darauf hingewiesen, dass die Magnetwicklung des Nebenschlussmotors unter der vollen Betriebsspannung steht. Daher ist eine sehr sorgfältige Isolation

notwendig und ausserdem zu bedenken, dass Nebenschlussmotoren kaum für eine beträchtlich höhere Spannung als 500 Volt im praktischen Betriebe sich bewähren dürften. Der Hauptstrommotor hat gerade hierin einen besonderen Vorzug vor dem Nebenschlussmotor vermöge seiner Hintereinanderschaltung der Ankerwicklung und der Magnetbewicklung. Die Magnetbewicklung des Hauptstrommotors wird immer nur unter einer Spannung stehen, welcher ein Bruchteil von etwa 2 bis 3% der ganzen Spannung ist, mit welcher die Anlage arbeitet. Denn die Spannung zwischen Anfang und Ende der Magnetbewicklung kann nicht höher sein, als sie durch das Produkt aus der normalen Stromstärke des Motors und dem Widerstande der Magnetbewicklung dargestellt wird. Nun muss aber bei der Ausführung des Hauptstrommotors naturgemäss darauf gesehen werden, den Drähten der Magnetbewicklung

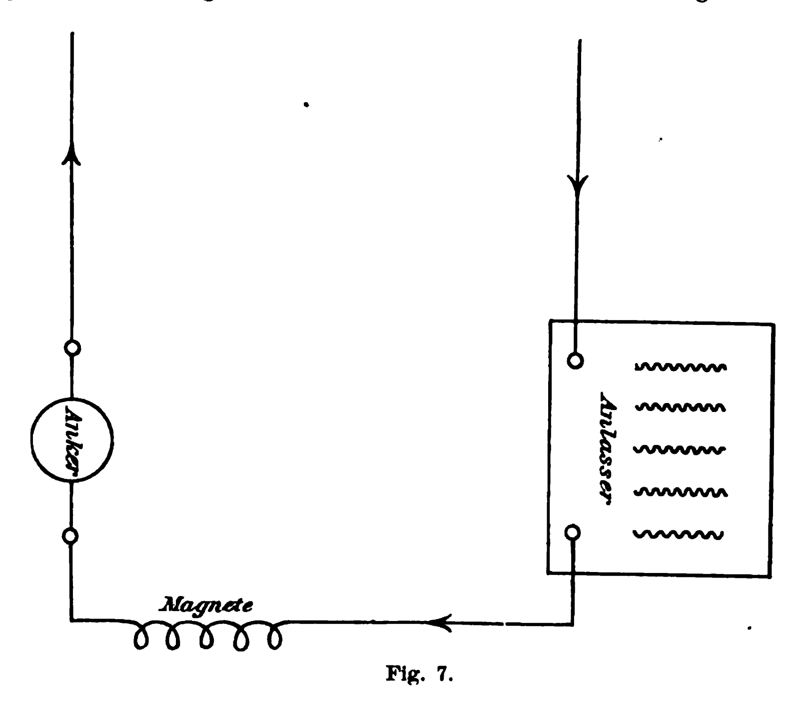



Fig. 7.

einen möglichst grossen Querschnitt zu geben, soweit der verfügbare Wickelraum es zulässt. Dieser möglichst grosse Querschnitt ist zur Vermeidung einer zu hohen Stromdichte und eines zu hohen Verlustes in der Magnetbewicklung, demnach einmal mit Rücksicht auf die Erwärmung, zweitens mit Rücksicht auf den Nutzeffekt der Maschine erforderlich.

Der Umstand nun, dass die Magnetbewicklung von Hauptstrommotoren unter einer verhältnismässig sehr geringen Spannung steht, legt es den Konstrukteuren von vornherein nahe, Hochspannungsmaschinen und Motoren möglichst nach dem Hauptstromsystem auszuführen. So finden wir nun, wenn wir nur wenige Jahre in der Entwickelung unserer Wissenschaft zurückgreifen, dass hochgespannte Kraftübertragungen mit Vorliebe und zwar bis zu 2000 Volt derartig ausgeführt wurden, dass eine hochgespannte Hauptstromdynamo einen gleichen Elektromotor oft in einer Entfernung von 7 bis 10 Kilometer antrieb. Natürlich sind derartige Kraftübertragungen in neuerer Zeit nach der herrlichen Entdeckung des Drehstromsystems, man möchte sagen,

aus der Mode gekommen, seitdem man unter Umständen über 100 Kilometer mit dreiphasigem Wechselstrom und unter Anwendung von stehenden Transformatoren Übertragungen machen kann. Indessen werden sich doch immer noch Kraftübertragungsanlagen finden, bei deren Beurteilung der ausführende Ingenieur der Hauptstromkraftübertragung den Vorzug geben wird.

Wir haben bisher von der Regulierungsfähigkeit von Hauptstrommotoren noch nicht gesprochen. Wie oben beim Nebenschlussmotor auseinandergesetzt worden ist, wird bei jedem Elektromotor für Gleichstrom die beste Regulierungsmethode in der Schwächung oder Verstärkung des magnetischen Feldes ihren Angriffspunkt finden. Wir werden daher von selbst darauf kommen, dass bei einem Hauptstrommotor das Magnetfeld durch Verstärkung oder Schwächung des in der Magnetwicklung laufenden Stromes zu beeinflussen ist. Diese Beeinflussung kann natürlich nicht geschehen, wie bei Nebenschlussmotoren durch Hintereinanderschaltung eines Regulators mit der Spulenbewicklung; denn dann würden wir nichts weiter haben als einen Vorschaltwiderstand und zwar einen Vorschaltwiderstand für die ganze Maschine mit dem Hauptnachteile dieser Apparate, bedeutende Kräfte zu verzehren. Ausserdem würde ja ein solcher Vorschaltwiderstand gerade das Umgekehrte zur Folge haben. Würde man ihn nämlich in diejenige Stellung bringen, dass sein ganzer Widerstand vorgeschaltet ist, so würde der Elektromotor am langsamsten laufen.

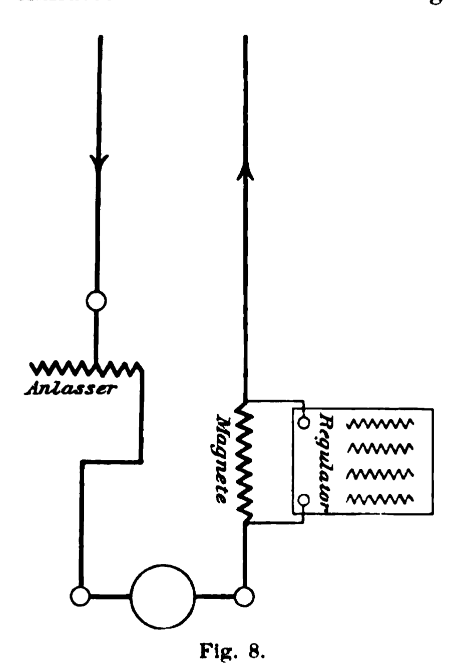


Fig. 8.

Es ist vielmehr der Tourenregulator beim Hauptstrommotor derart anzubringen, dass er sich in Parallelschaltung befindet zu der Magnetbewicklung des Motors (Fig. 8).

Läuft der Motor und ist der Tourenregulator ganz ausgeschaltet, sodass sein Widerstand unendlich gross ist, so macht der Motor eine bestimmte, für den Fall normale Tourenzahl. Es geht dann, wie leicht ersichtlich, die volle Stromstärke des Ankers auch durch die Magnetbewicklung; durch den Widerstand des Tourenregulators geht kein Strom, da er nach unserer Annahme unterbrochen ist. Schaltet man den Tourenregulator ein; angenommen auf den ersten Kontakt, so geht ein Teil des für die Magnetbewicklung bestimmten Stromes nicht mehr durch die letztere, sondern durch den Widerstand des Regulators. Das Verhältnis der Ströme in der Magnetwicklung und im Regulator entspricht dem umgekehrten Verhältnis der Widerstände. Demzufolge ist also natürlich der Strom in der Magnetbewicklung etwas schwächer geworden gegenüber dem ersten Falle; die Folge davon ist eine Schwächung des magnetischen Feldes und ein schnelleres Laufen des Motors. Nun kann dies fortgesetzt werden durch Verkleinerung des Widerstandes des Tourenregulators bis zu einer gewissen kleinsten Grenze, welche der höchsten vorgeschriebenen Tourenzahl des Motors entspricht. Niemals darf

jedoch der Tourenregulator kurzgeschlossen werden, da es gleichbedeutend wäre mit einer Überbrückung der Magnetbewicklung, sodass in der Magnetbewicklung kein Strom mehr fliessen würde, ein magnetisches Feld infolgedessen nicht mehr vorhanden wäre, infolgedessen die Tourenzahl des Motors sich ins Unendliche steigerte.

So bequem und angenehm diese Regulierung der Tourenzahl eines Hauptstrommotors durch einen sogenannten Parallelregulator ist, so hat doch eine andere Art der Regulierung grössere Verbreitung gefunden, nämlich die sogenannte Spulenschaltung. Sie erfordert allerdings einen komplizierteren Mechanismus, dessen praktische Ausbildung allmählich zu den bei Strassenbahnen und grossen Kränen allgemein üblichen Kontrollern geführt

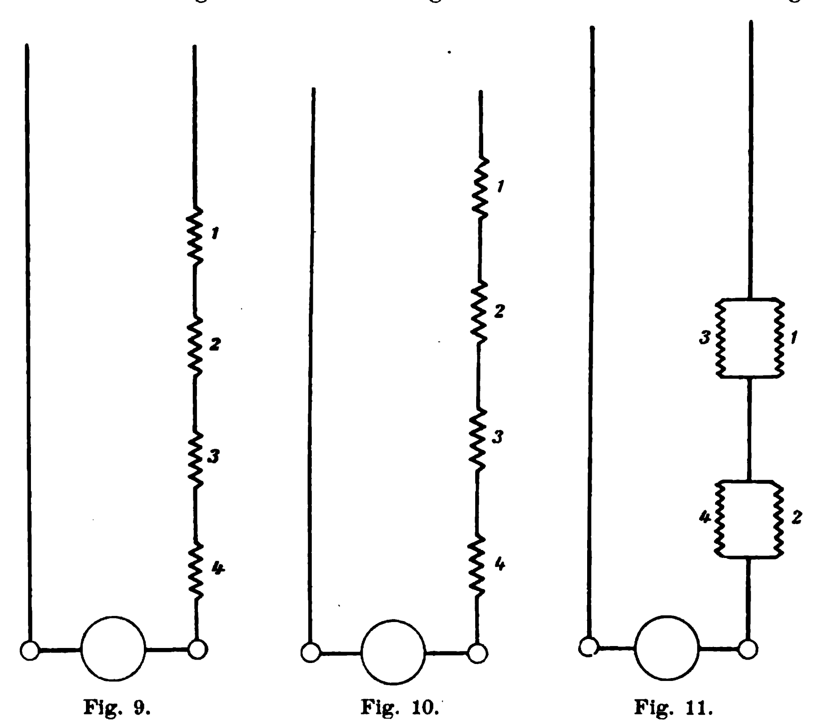



Fig. 9. Fig. 10. Fig. 11.

hat. Nach diesem System erhält der Motor und zwar möglichst ein vierpoliger Motor voneinander getrennte Magnetspulen. Schematisch würde es, wie in der folgenden Figur geschehen, anzudeuten sein (Fig. 9).

Die vier getrennten Magnetspulen, von der eine jede die Bewicklung eines Poles darstellt, werden nun zur Erreichung verschiedener Geschwindigkeiten verschieden geschaltet. Es lassen sich dann nun die verschiedenartigsten Kombinationen treffen; für die Praxis des Strassenbahnbetriebes und der Hebezeugtechnik hat sich indessen die Anwendung von drei Schaltungen herausgebildet. Für die niedrigste Tourenzahl des Motors werden die vier Spulen hintereinandergeschaltet (Fig. 10). Es fliesst nun der volle Strom durch $4m$-Windungen, falls jede Magnetspule $m$ Windungen besitzt. Bezeichnen wir die Stromstärke mit $i$, so ist die Ampèrewindungszahl bei dieser Schaltung gleich $4im$.

Bei der weiteren Regulierung der Tourenzahl werden je zwei Spulen parallel und die parallelen hintereinander in zwei Gruppen geschaltet (Fig. 11).

Hierbei ist darauf zu achten, dass die parallel zu schaltenden Spulen nebeneinanderliegende sind, dass also jedesmal ein Nordpol mit einem Südpol oder umgekehrt parallel zu schalten ist.

Nun passiert der Hauptstrom nicht mehr $4m$-Windungen, sondern nur noch $2m$-Windungen, wobei allerdings der Querschnitt auf das Doppelte gewachsen ist. Die Folge davon ist, dass die Ampèrewindungszahl nur noch beträgt $2im$; das magnetische Feld wird dadurch geschwächt und der Motor muss schneller laufen.

Schliesslich bei der letzten Regulierstufe werden alle vier Spulen zu einander parallel geschaltet (Fig. 12).

Wie leicht einzusehen ist, beträgt jetzt die wirksame Windungszahl nur noch $m$; der Querschnitt ist allerdings gegenüber der ersten Regulierstufe auf das vierfache gewachsen. Die Ampèrewindungszahl beträgt nur noch $im$; das Feld ist dadurch geschwächt und der Motor macht infolgedessen wiederum eine beschleunigte Tourenzahl.

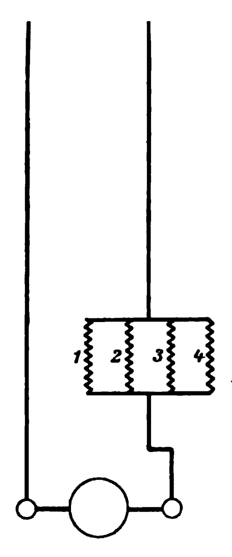



Fig. 12.

Diese Beziehungen sind indessen zur Genüge in Band X des Handbuches über die elektrischen Bahnen auseinandergesetzt. Ausserdem ist in theoretischer Beziehung das Studium des Handbuches von Fischer-Hinnen, vierte Auflage, Seite 100 bis 116 zu empfehlen. Ferner verweisen wir auf Schiemann, Elektrische Bahnen, I. Band, dritte Auflage, Seite 506 bis 528.

Es erschiene vielleicht noch notwendig, das Verhalten von Hauptstrommotoren einer Betrachtung zu unterziehen unter der Voraussetzung, dass sie nicht an eine konstante Spannung angeschlossen sind oder von einer Hauptstromdynamo betrieben werden, sondern dass sie stets von einem konstanten Strom durchflossen werden.

Es ist dies z. B. der Fall bei einem besonderen System der elektrischen Arbeitsübertragung auf grosse Entfernungen mit hochgespanntem Gleichstrom, wie es von der Firma Compagnie de l'Industrie électrique in Genf nach den Patenten des Herrn Thury ausgeführt worden ist. Wir kommen indessen später in einem der beschreibenden Kapitel auf die an und für sich sehr interessante Anlage und können deshalb auf ein näheres Eingehen auf die Wirkungsweise derartiger Elektromotoren verzichten. Immerhin ist der Standpunkt des Verfassers der, dass bei aller Anerkennung der grossartigen Ausführung aller Schalt- und Regulierapparate für diese Kraftübertragung doch neuerdings, seitdem man das Drehstromsystem in seiner eleganten Einfachheit zu verwenden imstande ist, derartige Anlagen den Eindruck selbstgewählter Schwierigkeiten erwecken. Wenn man aber imstande ist, eine Aufgabe einfach und mustergültig zu lösen, so ist es bei aller Anerkennung schwieriger glücklich durchgeführter Lösungen jedenfalls richtiger, die einfache Lösung vorzuziehen und sich nicht von seiner Vorliebe für ein bestimmtes immerhin veraltetes System zu Komplikationen verleiten zu lassen.

Wir wenden uns nun zu dem

## Compoundmotor.

Es ist aus Band III klar, dass Compound-Dynamo-Maschinen die hauptsächlichsten Vorteile des Nebenschlussdynamos und der Hauptstromdynamos in sich vereinigen. Ebenso vereinigt der Compoundmotor in sich zwei hervorspringende günstige Eigenschaften des Nebenschlussmotors nnd des Hauptstrommotors, allerdings in etwas abgeschwächter Form. Der Compoundmotor, dessen Schaltung die nachstehende Fig. 13 giebt, hat ein doppelt erregtes magnetisches Feld. Die Haupterregung dieses magnetischen Feldes besteht in einer gewöhnlichen Nebenschlusswicklung, welche unter der vollen Spannung der Anlage steht. Ausserdem wird aber der Hauptstrom in einigen Windungen um die Magnetpole herumgeleitet und übt daher ebenfalls einen Einfluss auf den Motor aus. Anknüpfend an die Nebenschlusswicklung können wir uns sagen, dass der Motor bestrebt sein wird, bei gleichbleibender Spannung eine möglichst konstante Tourenzahl trotz vorkommender Belastungsschwankung innezuhalten. Da der Motor aber ausserdem sein magnetisches Feld durch den Einfluss der Hauptstromwicklung bei Belastungsschwankungen ändern wird, so wird diese durch die Nebenschlusswicklung erreichte Konstanz der Geschwindigkeit keine vollkommene sein; der Motor wird immerhin Tourenschwankungen von 10 bis 20 % bei Belastungsschwankungen zeigen, je nachdem die Windungszahl seine Hauptstromwickluug kleiner oder grösser gewählt wird. Der Compoundmotor, können wir also sagen, hat gegenüber dem Nebenschlussmotor den kleinen Nachteil, dass er seine Geschwindigkeit bei Belastungsschwankungen nicht innezuhalten vermag, sondern in allerdings nicht allzuweiten Grenzen schwankt; er hat aber vor dem Hauptstrommotor den Vorteil, dass seine Tourenzahl **bedeutend geringeren** Schwankungen ausgesetzt ist, als es beim Hauptstrommotor der Fall ist; vor allen Dingen ist es möglich, einen Compoundmotor **vollständig zu entlasten**, ohne der Gefahr ausgesetzt zu sein, dass der Motor durchgeht und in Stücke fliegt.

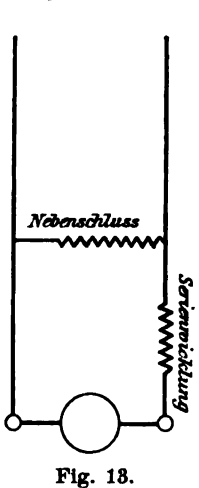


Fig. 13.

Ausgehend von der Hauptstrombewicklung des Compoundmotors ist es klar, dass der Motor eine ziemlich bedeutende Anzugskraft besitzen muss; allerdings wird diese Anzugskraft nicht so gross sein, wie bei dem nur mit Hauptstromwicklung ausgerüsteten Hauptstrommotor. Immerhin hat man es für die Fälle der Praxis in der Hand, das Verhältnis zwischen Nebenschlusswicklung und Hauptstromwicklung des Motors so zu wählen, wie es für den betreffenden Fall günstig ist. Es sind zum Beispiel sehr wohl Fälle denkbar, wo es weniger auf Innehaltung stets konstanter Tourenzahl ankommt, als vielmehr darauf, dass der Motor während des Betriebes grösseren Stössen gewachsen ist. Es wird sogar unter Umständen gefordert, dass der Elektromotor beziehungsweise die von ihm angetriebene Maschine beim Eintreten dieser Stösse langsamer laufen soll. Hier ist also eine kräftige Hauptstromwicklung am Platze.

Der Compoundmotor hat sich in der Elektrotechnik niemals einen hervorragenden Platz zu erringen gewusst. Unserer Ansicht nach liegt dies wohl zum grossen Teil an der Unbekanntschaft derjenigen, welche in den meisten Fällen elektrische Anlagen zu projektieren haben, mit dem Wesen des Hauptstrommotors. Würden unsere deutschen Installateure die Vorzüge des Compoundmotors zum Beispiel für Personenaufzüge genügend kennen, so unterliegt es für den Verfasser keinem Zweifel, dass dieses Gebiet für den Compoundmotor als ausschliessliche Domäne gelten könnte.

## Vorzüge und Nachteile der besprochenen Motorschaltungen und ihrer Anwendung in der Praxis.

Nachdem wir nun die drei möglichen Schaltungen von Gleichstrommotoren betrachtet haben, wollen wir uns noch einmal vergegenwärtigen, in welcher Weise am besten die Wahl zu treffen ist für die verschiedenen Anforderungen der Praxis. Im allgemeinen ist dabei natürlich die Voraussetzung zu treffen, dass eine Stromquelle von konstanter Spannung zur Speisung des Elektromotors zur Verfügung steht. Es wird im wesentlichen als Stromquelle eine grössere oder kleinere Centrale oder aber in Fabrikbetrieben in gleicher Weise eine Nebenschluss- oder Compounddynamomaschine den Strom liefern.

Der Nebenschlussmotor ist vermöge seiner Eigenschaft, konstante Tourenzahl innezuhalten, überall da anwendbar und anzuwenden, wo es sich um Maschinen und Apparate handelt, deren Tourenzahl während einer zusammenhängenden Arbeitsperiode sich nicht ändern soll. Hierher gehört vor allen Dingen der sogenannte Gruppenantrieb von Werkzeugmaschinen, aber auch ebenso der Einzelantrieb derselben. Auch elektromotorisch betriebene Pumpen bedürfen eines Nebenschlussmotors, da beim Pumpenantrieb die Möglichkeit einer plötzlichen Entlastung des Motors nicht ausgeschlossen ist und man daher die Anwendung eines Hauptstrommotors nicht für zulässig halten kann.

Der Hauptstrommotor findet, wie schon früher bemerkt, seine Anwendung überall da, wo neben der Forderung hoher Anzugskraft ein Wert auf konstante Tourenzahl n i c h t gelegt wird, und wenn es ausserdem ausgeschlossen ist, dass der Motor jemals durch Unvorsichtigkeit soweit entlastet wird, dass er durchgehen kann. Hierher gehören also die Antriebe der Ventilatoren bei direkter Kuppelung, von Herbezeugen, von Aufzügen, sowie vor allen Dingen von elektrischen Fahrzeugen aller Art. Nachdem in den letzten Jahren die elektrischen Strassenbahnen und neuerdings elektrische Bote und elektrische Automobilwagen einen hohen Aufschwung genommen haben, steht dem Gleichstrom-Hauptstrommotor ein ausserordentliches Verwendungsgebiet zur Verfügung.

Der Compoundmotor wird, wie schon oben bemerkt, wahrscheinlich eine seltene Verwendung nach wie vor finden in allen den Fällen, wo die Vermischung der Vorzüge der beiden anderen Schaltungsarten zweckdienlich erscheint.

## Besondere Motorschaltungen für maschinelle Zwecke.

Bereits weiter oben war erwähnt worden, dass mit Rüchsicht auf die Rückwirkung des magnetischen Ankerfeldes die Schwächung des Magnetfeldes

zum Zwecke der Erreichung höherer Tourenzahlen nicht allzuweit getrieben werden darf, weil sonst Bürstenfunken am Kollektor unvermeidlich sind. Wir nahmen da bei zweckmässiger Konstruktion des Elektromotors an, dass es noch gut gelingen wird, das Feld eines Motors bis zur Erreichnng der doppelten Tourenzahl zu schwächen. Gleichzeitig drängte sich uns der Wunsch der Praxis nach Elektromotoren auf, welche eine Regulierung ihrer Geschwindigkeit in viel weiteren Grenzen zulassen.

Der elektrotechnische Maschinenbau hat auch hierfür Mittel und Wege gefunden, um durch zweckmässige Konstruktionen dem Wunsch der Praxis entgegenzukommen.

Eine Möglichkeit, die Tourenzahl eines vierpoligen Motors beispielsweise zu verändern, ist dadurch gegeben, dass man die Polzahl durch eine zweckmässige Schaltung der Magnetwicklung während des Betriebes auf zwei vermindert, sodass der Motor zweipolig ist. Diese Veränderung der Polzahl aus vier in zwei Pole ist natürlich einfach durch Veränderung der Stromrichtung in zweien der Magnetspulen sehr wohl denkbar und sehr leicht ausführbar.

Bekanntermassen ist bei sonst gleichen Verhältnissen die Tourenzahl umgekehrt proportional der Polzahl eines Motors, sodass hier sehr einfach die Möglichkeit gegeben ist, die Tourenzahl auf das Doppelte zu steigern. Voraussetzung ist hierbei natürlich, dass der Anker des betreffenden Motors so gewickelt ist, dass seine Wicklung auch ohne weiteres sowohl für ein zweipoliges als auch für ein vierpoliges Magnetsystem passt; es wird infolgedessen eine Ringwicklung mit vier parallelen Abteilungen anzuwenden sein. Eine solche Ringwicklung, selbstverständlich ohne die sonst so sehr beliebte Ausgleichschaltung zwischen gleichpoligen Kollektorsegmenten nach Mordey, passt sowohl für einen zweipoligen als auch für einen vierpoligen Anker. Ausserdem sind natürlich im Augenblicke der Umschaltung Vorkehrungen zu treffen, um die Stromzufuhr zum Anker an die der Schaltung der Magnetpole entsprechende Stelle hinzuleiten, also bei zweipoliger Schaltung an zwei gegenüberliegende, bei vierpoliger Schaltung an zwei unter einem Winkel von 90 Grad liegende Stellen des Kollektors.

Die Anwendung dieser Schaltung für die Zwecke der Praxis scheint sich nicht bewährt zu haben; wenigstens ist dem Verfasser, abgesehen von einigen Patentschriften über die Ausführung wirklich praktischer Anlagen mit derartigen Elektromotoren nichts zu Ohren gekommen.

Eine Änderung der Tourenzahl durch Vergrössern oder Verkleinern des magnetischen Widerstandes des Körpers der Maschinen ist ebenfalls versucht worden, wenn auch gleich nicht für die Zwecke der Praxis mit sonderlichem Erfolge. Wenn nämlich der Luftraum zwischen Anker und Polschuhen vergrössert oder verkleinert wird, so nimmt die Stärke des magnetischen Feldes ab, beziehungsweise zu. Diese Regulierung ist infolgedessen kaum anders aufzufassen als wie die oben bereits beschriebene Regulierung mittelst eines Nebenschlussregulators oder eines Parallelregulators, da sie darauf hinausläuft, die Tourenzahl durch Schwächung oder Verstärkung des magnetischen Feldes zu beeinflussen. Es ist im Grunde genommen gleichgültig, an welcher Stelle im magnetischen Kreislauf des Motors die Regulierung durch die Veränderung eines Luftspaltes erzielt wird.

Zweckmässig wird es auf alle Fälle sein, den Luftspalt nicht in das Innere eines Poles zn verlegen, sondern die Pole selbst vom Anker zu ent-

fernen, beziehungsweise sie ihm zu nähern. Denn nur dann hat diese Regulierungsweise einen ersichtlichen Vorzug vor der Regulierung durch den Regulator. Dieser Vorzug besteht darin, dass bei der eintretenden Schwächung des magnetischen Feldes zu gleicher Zeit der Abstand zwischen Pol und Anker grösser, daher die Neigung der Maschine zu Funkenbildung kleiner wird.

Ausserdem könnte diese Regulierung auch zweckmässig folgendermassen eingerichtet werden. Es könnte zur Erzielung einer höheren Tourenzahl in den Polen und zwar parallel zum Verlaufe der Kraftlinien ein Schlitz entstehen, welcher einerseits eine Schwächung des Magnetfeldes durch die Entziehung eines bedeutenden leitenden Querschnittes zur Folge hätte, andererseits aber die Rückwirkung der Ankerkraftlinien stark beeinträchtigen und daher eine Funkenbilduug in weiteren Grenzen vermeiden würde.

Indessen auch diese Regulierungsmethode hat zwei Fehler, erstens den Fehler, einer ausserordentlichen maschinentechnischen Komplikation, da es durchaus nicht so einfach erscheint, Motoren mit regulierbarem Luftraum zu bauen. Sie hat indessen für die oben genannten Fälle der Praxis den zweiten Fehler, dass auch sie eine Regulierung im Verhältnis von eins zu drei nicht sehr wesentlich überschreiten wird ohne durch Funkenbildung den Kollektor des Motors anzugreifen.

Die beste Methode, mit ein und demselben Elektromotor ausserordentlich verschiedene voneinander abweichende Tourenzahlen zu erzielen, beruht auf der Möglichkeit, die Ankerwindungszahl zu verändern. Bei sonst gleichen Verhältnissen, dass will also heissen, vor allen Dingen bei gleichbleibender Spannung und gleichbleibender Feldstärke ist die Tourenzahl eines Motors umgekehrt proportional der Windungszahl seines Ankers. Man kann nun leicht einen Anker mit zwei Kollektoren versehen und demgemäss zwei getrennte Wicklungen auf dem Anker anbringen, deren eine jede von der anderen isoliert ist. Nehmen wir an, dass wir auf einem Anker zwei Wicklungen angebracht hätten, von denen eine jede 100 Windungen besitzt. Wir können nun diese beiden Ankerwicklungen parallel oder hintereinander schalten. Schalten wir sie hintereinander, so ist die Windungszahl gleich 200 und wir wollen annehmen, dass bei dieser Windungszahl der Motor 500 Touren per Minute macht. Schalten wir die Maschine aber so, dass wir nur 100 Windungen haben, wozu wir entweder die eine Wicklung oder die andere Wicklung oder schliesslich beide Wicklungen parallel benutzen können, so wird der Motor die Tourenzahl 1000 annehmen. Wir können nun das Verhältnis der Windungszahl noch zweckmässiger ändern. Nehmen wir z. B. an, dass die eine Ankerwicklung 50 Windungen und die andere Ankerwicklung 150 Windungen hat, so ergeben sich folgende Tourenzahlen.

Schalten wir eins mit zwei hintereinander, so haben wir 200 Windungen, Tourenzahl wie oben angenommen 500. Nehmen wir die Wicklung zwei allein, so haben wir Windungszahl 150, Tourenzahl 667. Schalten wir die Wicklung eins derart, dass sie der Wicklung zwei entgegenwirkt, so haben wir die Windungszahl 100, Tourenzahl 1000; nehmen wir schliesslich die Wicklungen eins allein, so haben wir 50 Windungen und dementsprechend die Tourenzahl 2000. Wir haben also die Möglichkeit die Tourenzahl des vorliegenden Motors zwischen 500 und 2000 zu regulieren. Wir haben aber nicht nur die Möglichkeit, die oben genannten Tourenzahlen hervorzubringen,

sondern können auch jede andere beliebige Tourenzahl innerhalb der Werte 500 und 2000 erreichen. Wir brauchen nur noch einen Nebenschlussregulator zu verwenden und mit diesem Nebenschlussregulator das magnetische Feld zu schwächen. Es ist angenommen, das bei den vorhin genannten Tourenzahlen das magnetische Feld so stark als möglich ist. Wir werden deswegen schon durch die Regulierung mittelst Regulator die Tourenzahl des Motors auf das doppelte steigern können. Wir werden also mit Sicherheit alle zwischen 500, 667, 1000 und 2000 gelegene Tourenzahlen erreichen können. Damit aber nicht genügend, können wir natürlich auch den Motor, wenn er mit 50 Windungen und 2000 Touren bei starkem Magnetfelde läuft, durch solchen Nebenschlussregulator auf 4000 Touren hinaufbringen. Wir haben also ersichtlich eine Regulierungsmöglichkeit von 500 auf 4000, das heisst, bei diesem willkürlich gehaltenen Beispiel eine Regulierung von eins zu acht. Natürlich wird man die Tourenzahl in der Praxis wohl etwas anders wählen, vor allen Dingen die äusserste Grenztourenzahl nicht so ausserordentlich hoch annehmen, wenn gleich ein Elektromotor für 4000 Touren selbst für Gleichstrom noch gute Resultate geben kann.

Es ist nun wohl ersichtlich, wie man durch geeignete Wahl der Windungszahl der beiden getrennten Ankerwicklungen Elektromotore konstruieren kann, welche in Bezug auch ihre Regulierungsfähigkeit den weitgehendsten Ansprüchen genügen.

Eine eigenartige Möglichkeit, die Tourenzahl der Elektromotore zu beeinflussen, besteht auch darin, dass man beispielsweise für grössere Anlagen. in welchen viele einer Regulierung bedürfende Elektromotoren laufen, die Primäranlagen derartig einrichtet, dass sie einem Dreileiternetz entspricht, indessen in der Weise, dass zwischen dem positiven und dem Nullleiter nur die Hälfte derjenigen Spannung herrscht, wie zwischen dem Nullleiter und dem negativen Leiter. Nehmen wir beispielsweise ein derartiges Dreileiternetz in einer mit vielen Druckmaschinen ausgestatteten Kattundruckerei an. Zwischen dem positiven und dem Nullleiter bestehe eine Spannung von 100 Volt, zwischen dem Nullleiter und dem negativen Leiter eine Spannung von 200 Volt. Je nach dem nun die Elektromotoren mit ihrem Anker an 100, 200 oder 300 Volt angeschlossen werden und je nach dem man die Nebenschlusswicklung an diese genannte Spannung anlegt, ergeben sich Tourenzahlen ungefähr derart, dass die höchste Tourenzahl etwa sechs mal so hoch ist, als die niedrigste. Dieses Mehrleitersystem kombiniert mit dem vorhin beschriebenen System von Elektromotoren mit zwei Ankerwicklungen, würde die vollkommenste Lösung der Aufgabe bedeuten, Elektromotoren für die Praxis der Kattundruckereien zu bauen, welche sich in ausserordentlichen Grenzen regulieren lassen.

Nehmen wir unser altes Beispiel auf, nach welchem nach Veränderung der Windungszahl des Ankers ohne Zuhülfenahme des Regulators eine Tourenzahl von eins zu vier erhielten und kombinieren wir damit ein Dreileitersystem der beschriebenen Anordnung, so werden wir finden, dass bereits ohne Zuhülfenahme eines Nebenschlussregulators zur Steigerung der letzterreichten Tourenzahl die Möglichkeit gegeben ist, die Elektromotoren von eins zu zwölf zu regulieren. Diese Regulierung von eins zu zwölf erscheint selbst für die eigentümliche Verwendung der Kattundruckmaschinen als genügend.

Nachdem wir nun im Vorstehenden uns über Schaltung von Gleichstrommotoren nach Möglickeit klar geworden sind, wollen wir im folgenden soweit es nötig erscheint, einiges über den praktischen Entwurf und die Berechnung von Gleichstrommotoren sagen.

## Entwurf und Berechnung von Gleichstrommotoren.

Der Entwurf und die Berechnung von Gleichstrommotoren unterscheidet sich so wenig von dem Entwurf und der Berechnung von Gleichstromdynamomaschinen, dass ohne weiteres alles, was in Band III und IV des Handbuches über die in Betracht kommenden Regeln gesagt ist, auch auf die vorliegende Aufgabe Bezug hat. Es ist vielleicht deshalb am zweckmässigsten, nur auf gewisse kleine Unterschiede hinzuweisen, ohne allzu sehr auf die Theorie Bezug zu nehmen, und den durch diese Beschränkung gewonnenen Platz durch die Berechnung einer ganzen Anzahl von Beispielen in einer für die Praxis nutzbringenden Weise auszunutzen.

Ein gewisser Unterschied in der Berechnung liegt in der Wahl der Sättigung des Magnetsystems. Während man bei Dynamomaschinen — sofern es sich nicht um Maschinen für die Ladung von Batterien handelt — bestrebt ist, die Kraftliniendichte möglichst hoch zu wählen, nicht nur im Stahl oder Eisen, sondern auch, was ja schliesslich nur eine Folge davon ist, auch am Polrande, so wird man bei Elektromotoren nicht mit gleicher Notwendigkeit auf hohe Dichten hingewiesen sein. Bei den Dynamomaschinen erzielt man durch hohe Sättigung eine gewisse Konstanz in der Spannung von Nebenschlussmaschinen bei schwankender Belastung, eine Bedingung, die natürlich bei Motoren fortfällt. Dagegen wird oft die Bedingung gestellt, dass man durch Verstärkung des magnetischen Feldes die Tourenzahl noch etwas zu vermindern in der Lage sein soll, weshalb es nötig ist, bei Elektromotoren die Magnetkörper von vornherein für ihren normalen Betriebszustand nicht zu hoch zu sättigen.

Ein zweiter unterscheidender Punkt ist, dass man zwar selten von Dynamomaschinen eine hohe Überlastungsfähigkeit erlangt, dass man dagegen von einem guten Elektromotor fordert, dass er sich bequem auf kurze Zeit um 50 % überlasten lässt, ohne einer Bürstenverstellung zu bedürfen und ohne schädliche Funkenbildung zu zeigen.

Infolgedessen hat der Konstrukteur beim Entwurfe des Magnetkörpers alle die Regeln zu beachten, deren Befolgung die Wahrscheinlichkeit einer geringen Ankerrückwirkung giebt.

In der Praxis haben sich zwei sehr einfache Konstruktionen bewährt, welche mit Sicherheit zu einer geringen Ankerrückwirkung führen und den Vorzug besitzen, den Preis des Motors nicht zu erhöhen.[1])

Bekanntlich denkt man sich nach Gisbert Kapp die Rückwirkung der Ankerströme auf das Magnetfeld des Motors folgendermassen. Man nimmt an, dass die Bürsten eines zweipoligen Motors bei *a* und *b* schleifen. Dann fliesst

---

1) Beide Konstruktionen gemeinsam werden vom Verfasser bei den von ihm entworfenen Motorentypen der Magdeburger Elektromotorenfabrik mit ersichtlichem Nutzen angewandt. Beide Methoden sind übrigens seit langem bekannt, weshalb der Verfasser nicht etwa den Anspruch erhebt, sie zum ersten Male in die Praxis eingeführt zu haben.

der Strom in allen Ankerdrähten, welche zwischen *acb* liegen, in umgekehrter Richtung als in denjenigen Ankerdrähten, welche zwischen *adb* befindlich sind. Die Linien *ab* und *cd* stellen die Verbindungslinien zweier gegenüberliegender Polspitzen dar und gehen deshalb durch den Mittelpunkt des Ankers (Fig. 14).

Man betrachtet nun die Drähte zwischen den kleinen Kreissegmenten *ad* und *bc* als zusammengehörig und in ihrer Wirkung gleich einer Spule, welche Kraftlinien erzeugt in einer Richtung, welche der Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes genau entgegengesetzt ist. Hierdurch wird das Magnetfeld natürlich geschwächt und zwar in einer Weise, die sich einfach rechnerisch verfolgen lässt, wann man den Centriwinkel *aEd* kennt. Ist z. B. dieser Winkel = 60°, was in den meisten Fällen bei zweipoligen Motoren zutrifft, so ist die wirksame Zahl der Anker-Ampèrewindungen

$$i_a \cdot m_a \cdot \frac{120}{360} \cdot 0{,}5.$$

Die Ampèrewindungszahl des Magnetfeldes

$$= i_n \cdot m_n$$

wird also vermindert auf

$$= i_n \cdot m_n - i_a \cdot m_a \cdot \frac{120}{360} \cdot 0{,}5$$

$$= i_n \cdot m_n - {}^1/_6 \, i_a \cdot m_a .$$

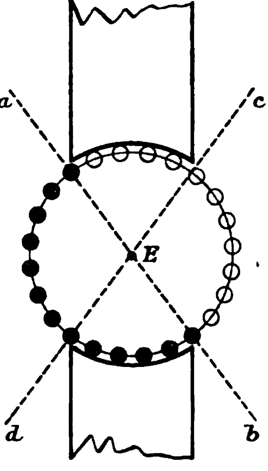


Fig. 14.

Aus der Magnetisierungskurve der Maschine ist aber leicht ersichtlich, um wieviel durch diese Verminderung die totale Kraftlinienzahl abnimmt.

Es muss demnach ein Mittel gesucht werden, um diese sogenannte „Längsmagnetisierung" zu verringern. Die Anwendung sehr weit umfassender Polschuhe, wodurch also der Winkel *aEd* sehr klein würde, hat schwere Bedenken, weil hierdurch die Quermagnetisierung befördert wird. Dagegen sind von verschiedenen Seiten eine ganze Anzahl von zweckmässigen Ankerwicklungen angegeben worden, welche alle den Zweck verfolgen, die Stromrichtung in den zwischen den kleinen Segmenten *ad* und *bc* befindlichen Drähten so zu gestalten, dass infolge einer gegenseitigen Aufhebung benachbarter entgegengesetzt gerichteter Ströme eine Solenoidwirkung nicht mehr eintritt.

Am einfachsten ist eine von Mordey angegebene Wicklung, deren Durchführung auf jedem Anker möglich ist. Während gewöhnlich die Ankerspulen zweipoliger Motoren derart auf den Ankern aufgewickelt werden, dass Anfang und Ende auf dem Umfang des Ankers um 180° auseinanderliegen, wickelt Mordey derart, dass Anfang und Ende der Spule nur um einen Winkel auseinanderliegen, welcher wenig grösser ist als der Polschuhcentriwinkel *aEc*.

Es heben sich also in allen zwischen den kleinen Segmenten *ad* und *cb* befindlichen Ankerdrähte die Ströme gegenseitig auf, die Längsmagnetisierung ist also vollständig vermieden.

Gerade weil dieses Mittel so einfach ist, verdient es uneingeschränkte Anwendung; doch ist es notwendig hervorzuheben, dass es mit Vorsicht anzuwenden ist; vor allem ist der Centriwinkel zwischen Anfang und Ende einer Ankerspule nicht zu knapp zu bemessen; es ist vielmehr zu bedenken, dass eine mehr oder minder grosse Streuung der Polspitzen leicht zur Folge haben kann, dass Anfang und Ende derselben Ankerspule sich unter der Einwirkung desselben Polschuhes befinden, was natürlich eine starke Funkenbildung bereits bei Leerlauf der Maschine verursachen würde.

Ebenso wie wir die zwischen den kleinen Segmenten *ad* und *bc* befindlichen Ankerdrähte in ihrer Wirkung als Längsmagnetisierung zusammengefasst haben, lassen sich die zwischen den kleinen Segmenten *ac* und *db* gelagerten Drähte als Solenoid mit der Wirkung einer Quermagnetisierung (nach Kapp) betrachten. Diese so erzeugten Kraftlinien sind nicht entgegengesetzt gerichtet zu den Kraftlinien der Magnetpole, sondern verlaufen unter einem rechten Winkel zu letzteren. Ihre Schädlichkeit besteht daher nicht etwa in einer entmagnetisierenden Wirkung, sondern darin, dass sie ein resultierendes Feld zur Folge haben, welches in seiner Richtung gegen das eigentliche Magnetfeld verschoben erscheint. Die Quermagnetisierung hat also bei schlecht entworfenen Maschinen eine Verschiebung der neutralen Zone und hiermit der Bürstenbrille zu Folge, ein Umstand, der bei einem guten Elektromotor absolut vermieden werden muss.

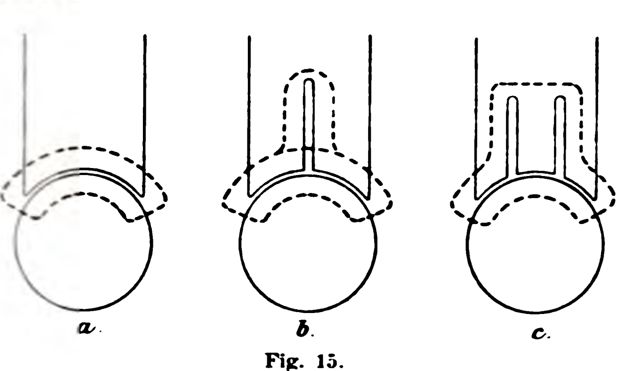


Fig. 15.

Die Quermagnetisierung lässt sich nun zweckmässig und ohne Kosten dadurch vermeiden, dass man den Luftweg der durch das Quersolenoid erzeugten Kraftlinien so gross als möglich macht. Am einfachsten geschieht dies durch tiefe Schlitze in den Polen. Die in Rede stehenden Querlinien müssen sich natürlich durch den Pol hindurch ihren geschlossenen Kreis suchen; schlitzt man daher an einer oder mehreren Stellen den Pol, so finden die Querlinien einen erheblich höheren magnetischen Widerstand auf ihrem Wege vor; die Folge ist, dass nur eine geringere Anzahl entstehen kann (Fig. 15).

Es ist hier vielleicht der Ort, auf eine sehr einfache Methode der Berechnung der Ankerrückwirkung hinzuweisen, die zu gleicher Zeit darüber Licht verbreitet, wie es kommt, dass man in einzelnen elektrotechnischen Werken ganz verschiedenartigen Anschauungen darüber begegnet, ob die „Ankerrückwirkung" das Magnetfeld schwächt oder verstärkt.

Es sei $\delta$ der Mittelpunkt des Ankers, und wir denken uns an diesem Punkte $\delta$ die Kräftepaare angreifend (Fig. 16):

$\delta\gamma$ = Polkraftlinien,

$\delta\varepsilon$ = Längslinien,

$\delta\zeta$ = Querlinien.

Dann muss, wenn

$$\beta\gamma = \varepsilon\delta$$

von $\delta\gamma$ abgezogen und die Kräftepaare $\delta\zeta$ und $\delta\beta$ zu einer resultierenden vereinigt sind, natürlich $a\delta$ die nunmehr auftretende resultierende Feldstärke sein, vorausgesetzt, dass die Bürstenstellung, wie dies bei einem Elektromotor anzunehmen ist, konstant geblieben war.

Man sieht ohne weiteres, dass es für die Frage, ob die Resultierende $a\delta$ grösser oder kleiner ist als die Strecke $\delta\gamma$, lediglich auf die Grösse von $\delta\varepsilon$, die Längslinien, ankommt. Überwiegt daher die Längsmagnetisierung — und das wird bei gewöhnlich gewickelten Ankern wohl immer der Fall sein — so wird das ursprüngliche durch $\delta\gamma$ gegebene Feld geschwächt. Nehmen wir jedoch theoretisch an, dass infolge einer zweckmässigen Sehnenwicklung die Längsmagnetisierung aufgehoben sei, so muss das ursprüngliche Feld $\delta\gamma$ verstärkt werden zu $\delta a$ durch den Einfluss von $\delta\zeta$, der Quermagnetisierung, unter der Voraussetzung, dass die Bürstenstellung konstant ist.

Ein Unterschied zwischen dem Verhalten von Elektromotoren und Dynamomaschinen ist natürlich in keiner Weise vorhanden und sind derartige Behauptungen zu verwerfen.

Streng genommen stellen die Kräftepaare magnetische Felder, also Kraftlinienzahlen dar; für die Zwecke der Berechnung ist es aber durchaus zulässig, die Ampèrewindungen dafür einzusetzen, zumal es bei Elektromotoren nicht sehr auf die Berechnung der Ankerrückwirkung ankommt.

Fig. 16.

Wir wenden uns nun dazu, an einer Anzahl aus der Praxis genommener Beispiele den Entwurf und die Berechnung von Gleichstrommotoren zu veranschaulichen, wobei wir uns in den Formeln häufig auf das kleine Werk „Praktische Dynamokonstruktion von Ernst Schulz", zweite Auflage, Verlag von Julius Springer, Berlin und R. Oldenbourg, München, beziehen werden. Eins glauben wir indessen an dieser Stelle noch einschalten zu müssen, um spätere Auseinandersetzungen zu vermeiden.

Es sind von verschiedenen Seiten Formeln aufgestellt worden, um für eine Maschine von geforderter Leistung und Tourenzahl den Ankerdurchmesser $a$ und die Ankerlänge $b$ oder wenigstens das Produkt beider vorher zu bestimmen Allen solchen Formeln ist das Eine gemeinsam, dass sie nur für mittelgrosse Maschinen richtige Werte liefern, dagegen für kleine und grosse Maschinen nur unter Berücksichtigung von Zuschlägen gebraucht werden können. Es soll indessen auch an dieser Stelle nicht versäumt werden, auf das Handbuch von Fischer-Hinnen hinzuweisen, in welchem eine derartige Formel gegeben und auch deren Anwendbarkeit in richtiger Weise vorsichtig beschränkt wird.

Demgegenüber halten wir an der Anschauung fest, dass es richtiger ist für die Praxis, die linearen Abmessungen des Ankers einer neuen Maschine aus den bekannten Abmessungen bereits bestehender Ausführungen abzuleiten. Der Verfasser hat im Heft 36 des Jahrganges 1893 der elektrotechnischen

Zeitschrift in einem längeren Aufsatz nachgewiesen, dass es sehr wohl möglich ist, eine solche Ableitung zu machen. Das Resultat der Untersuchungen, welches auch heute noch volle Gültigkeit hat, lässt sich kurz folgendermassen ausdrücken:

Bezeichnen wir

mit $a_1$ den Ankerdurchmesser einer bekannten Maschine,

„ $a_2$ „ gesuchten Ankerdurchmesser einer zweiten Maschine,

„ $L_1$ die Leistung der ersten Maschine,

„ $L_2$ „ „ „ zweiten Maschine,

wobei diese Leistungen auf dieselbe Tourenzahl bezogen werden müssen, so ergiebt sich

$$a_2 = a_1 \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{\mu}}$$

und zwar ergiebt sich für den Faktor $\mu$ der Wert

$$\mu = 2{,}6.$$

Was die Ankerlänge $b$ anbetrifft, so gilt natürlich genau das gleiche Gesetz; es gilt dasselbe überhaupt für alle magnetischen Dimensionen.

Im allgemeinen lässt sich ferner für das Verhältnis von $b$ zu $a$ bemerken, dass dasselbe um so kleiner wird, je grösser die Polzahl der Maschine ist; so findet man in den meisten praktischen Ausführungen folgende Mittelwerte am häufigsten:

Für zweipolige Maschinen $b = 1{,}5 \cdot a$,

„ vierpolige „ $b = a$,

„ achtpolige „ $b = 0{,}5\ a$.

## Beispiel I.

### Nebenschlussmotor für 220 Volt 16 PS., 1100 Touren.

Wir wollen diese Aufgabe in zwei verschiedenen Lösungen durchnehmen, nämlich einmal unter Annahme eines zweipoligen und dann unter Zugrundelegung eines vierpoligen Magnetgestelles (Fig. 17).

Wir nehmen also zunächst eine zweipolige Manteltype mit Nutenanker (Trommelwicklung) an und setzen als einen nach der soeben entwickelten Beziehung zwischen Ankerdurchmesser und Leistung ermittelten Wert den Ankerdurchmesser

$$a = 22{,}5 \text{ cm.}$$

Nach der angegebenen Beziehung zwischen dem Ankerdurchmesser und der Ankerlänge bei zweipoligen Maschinen machen wir

$$b = a \cdot 1{,}5$$

und erhalten so die Ankerlänge

$$b = 34 \text{ cm.}$$

Für die Höhe des Polschuhes $c$ nehmen wir einen Wert, welcher dem erfahrungsgemäss von vielen Konstrukteuren adoptierten Centriwinkel

$$\varphi = 120^0$$

entspricht, also

$$c = a \cdot \sin \frac{120^0}{2}$$

$$c = 0{,}87 \cdot a$$

$$c = 19 \text{ cm abgerundet.}$$

Der ganze Magnetkörper sei in einem Stück aus weichem grauem Gusseisen gegossen; die Pole seien daher von rechteckigem Querschnitt; letzterer beträgt

$$c \cdot b,$$

da die Pollänge mit der Ankerlänge übereinstimmen muss. Der Wert des Polquerchnittess ist also

$$c \cdot b = 19 \cdot 34 = 646 \text{ cm}^2.$$

Wir werden später die Ankerbewicklung des Motors so wählen, dass die Kraftliniendichte im Polquerschnitt etwa 7000 cgs beträgt, was bei Gusseisen für kurze Pole zulässig ist. Hoher Sättigungsgrad der Pole, daher geringe Ankerwindungszahl, ist, wie wir wissen, für exaktes Arbeiten nötig.

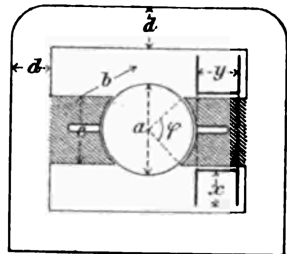


Fig. 17.

Wir wollen aber, entsprechend unseren früheren Darlegungen über die Beschränkung der Querlinien beide Pole des Motors mit Schlitzen von 10 mm Höhe versehen, wie dies in der Querschnittszeichnung vorstehender Figur zu erkennen ist. Es vermindert sich hierdurch der Querschnitt der Pole um etwa 5 % an den Stellen, wo der Schlitz vorhanden ist.

Der Mantel hat natürlich die gleiche Länge wie der Anker und die Pole; allerdings wird er oft länger gemacht, um die Spulenkästen zu verdecken; wir wollen indes bei einem Beispiel davon absehen.

Der Mantelquerschnitt muss so bemessen sein, dass die Dichte der Kraftlinien, welche im Mantel ja einen langen Weg zurücklegen müssen, nicht höher als 5000 cgs ist, weil sonst die Ampèrewindungszahl bei Gusseisen zu hoch wird. Unter der Berücksichtigung, dass die beiden Mantelhälften jede nur die halbe Anzahl der Kraftlinien, welche im Pole verlaufen, führen, muss also der Querschnitt des Mantels

$$b \cdot d = 646 \cdot \frac{7000}{5000} \cdot \frac{1}{2} = 450 \text{ cm}^2$$

werden, da wir im Pol mit 7000 cgs Dichte bei 646 cm² Querschnitt arbeiten wollen.

Es ergiebt sich daher die Manteldicke

$$d = \frac{450}{34} = 13{,}2 \text{ cm.}$$

Höhe und Breite der ganzen Maschine sind im übrigen lediglich davon abhängig, welche Dimensionen wir den Magnetspulenkästen geben; da sich

Am Polrande, wo der Querschnitt natürlich grösser ist, weil der Abschnitt der Peripherie grösser ist als die zugehörige Sehne, beträgt die Dichte

$$7000 \cdot \frac{19{,}0}{22{,}5 \cdot \pi \cdot \frac{120^0}{360^0}} = 5650, \; cgs,$$

da $c = 19{,}0$ die Polhöhe und der Wert

$$22{,}5 \; \pi \cdot \frac{120}{360}$$

den Polrand darstellt.

Die Dichte in den Zähnen an der Ankerperipherie ist, da Zahn und Nute

$$= 1{,}04 \text{ cm},$$

der Zahn

$$= 0{,}54 \text{ cm}$$

ist, gleich

$$5650 \cdot \frac{1{,}04}{0{,}54} = 10\,900 \; cgs.$$

Und ebenso ist im Zahnfuss die Dichte

$$5640 \cdot \frac{1{,}04}{0{,}38} = 15\,500 \; cgs.$$

Es sind dies Werte, welche in magnetischer Beziehung ganz zufriedenstellend genannt werden können.

Wir müssen nun die zu erwartende Erwärmung des Ankers bei normaler Stromstärke kontrollieren und bedienen uns dazu der von Fischer-Hinnen in seinem Handbuch angegebenen Formel

$$T_a = \frac{225 \cdot \text{Gesamtverluste im Anker}}{\text{Oberfläche des Ankers}},$$

worin $T_a$ die Temperaturerhöhung nach mehrstündigem Lauf.

Die Gesamtverluste sind:

1) Wattverlust in der Ankerwicklung,

2) Hysteresisverluste,
   a) in den Zähnen,
   b) im Ankereisen,

3) Wirbelströme,
   a) in den Zähnen,
   b) im Ankereisen.

1) Der Wattverlust in der Ankerwicklung beträgt:

$$J^2 \cdot w_a = \frac{58^2 \cdot 0{,}018 \cdot l_a \cdot 136}{4 \cdot 9{,}7} = \frac{58^2 \cdot 0{,}018 \cdot 1{,}4 \cdot 136}{4 \cdot 9{,}7},$$

wo $l_a = 1{,}4$ m die Länge einer Ankerwindung bedeutet.

Demnach

$$J^2 \cdot w_a = 320 \text{ Watt}$$

2) Der Hysteresisverlust ist bekanntlich:

$$H = \eta \cdot B^{1,6} \cdot \omega \cdot V \cdot 10^{-7} \text{ in Watt,}$$

wo

$$\omega = \frac{\text{Polzahl} \times \text{Tourenzahl}}{120}$$

die Periodenzahl in der Sekunde und $V$ das Eisenvolumen in cm$^3$ ist,

a) in den Zähnen ist die mittlere Dichte

$$B = 13\,200,$$

das Volumen

$$V = 0{,}46 \cdot 1{,}7 \cdot 34 \cdot 68 = 1800 \text{ cm}^3,$$

ferner ist

$$\omega = 18{,}3$$

und es wird angenommen

$$\eta = 0{,}003,$$

demnach Hysteresisverlust in den Zähnen = 38 Watt,

b) im Ankereisen ist, wenn wir das Achsenloch in den Blechscheiben zu 7,0 cm annehmen, der magnetische Querschnitt

$$2 \cdot 6{,}0 \cdot 34 = 408 \text{ cm}^2,$$

demnach die Dichte

$$B = 11\,000 \text{ rd},$$

das Volumen

$$V = 8250 \text{ cm}^3,$$

also Hysteresisverlust

$$= 133 \text{ Watt.}$$

3) Die Verluste durch Wirbelströme können zwar bei schlecht überdrehten oder gefrästen Ankern bedenkliche Werte annehmen; indessen treten sie bei gut gefertigten Armaturen in den Hintergrund.

Demnach sind die Verluste:

$$320 + 38 + 133 = 491 \text{ Watt.}$$

Die Oberfläche des Ankers ist:

$$O = 3200 \text{ cm}^2,$$

wenn man beide Stirnflächen als abkühlend rechnet.

Es ist ferner $v$ = Umfangsgeschwindigkeit = 13 m. Folglich ergiebt sich endlich nach der Formel von Fischer-Hinnen

$$T_a = \frac{225 \cdot 491}{3200} = 35^0 \text{ C.}$$

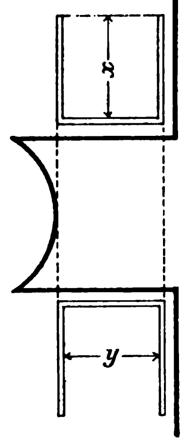


Fig. 19.

Wir gehen nun über zur Berechnung der Magnetspulen (Fig. 19).

Nach der Magnetisierungskurve für weiches graues Gusseisen ergeben sich die Ampèrewindungen für Mantel und Pole wie folgt:

| | | |
|---|---|---|
| Mantel: | 5000 $cgs$ | |
| | 20 AW per cm | AW = 100 · 20 = 2000 |
| | 100 cm | |
| Pole: | 7000 $cgs$ | |
| | 40 AW per cm | AW = 20 · 40 = 800 |
| | | Summe 2800 |
| | 20 cm | |

Für den einfachen Luftabstand wählen wir bei dieser bereits mittelgrossen Maschine

$$\delta = 0{,}375 \text{ cm},$$

also

$$2\delta = 0{,}75 \text{ cm}.$$

Es ist nun bereits oben gefunden worden:

die Dichte am Polrand . . . . . . . . $D_{pr} = 5650\ cgs$

die Zahndichte oben . . . . . . . . . $D^z = 10\,900\ cgs,$

demnach die mittlere Dichte im Luftraum $D_l = \frac{10\,900 + 5650}{2},$

also . . . . . . . . . . . . . . . $D_l = 8275\ cgs.$

Demnach ergiebt sich für die Ampèrewindungen des Luftraumes der Wert

$$AW = 0{,}8 \cdot 8275 \cdot 0{,}75,$$

also

$$AW = 4950.$$

Es ergiebt sich aus vorstehendem die totale Anzahl Ampèrewindungen des Motors zu

$$AW_{total} = 7750.$$

Für die $AW$-Zahl ist nun der entsprechende Durchmesser unter der Voraussetzung zu berechnen, dass die Magnetwicklung im Nebenschluss zum Anker liegt.

Diese Berechnung ist folgendermassen auszuführen. Es bedeutet

$i_n$ den Nebenschlussstrom,

$m_n$ die Windungszahl der Magnete total,

$w_n$ den Widerstand der Magnete,

$l_n$ die mittlere Länge in $m$ einer Magnetwindung,

$E$ die Spannung,

$q$ den Querschnitt des Nebenschlussdrahtes,

$\delta_n$ den Durchmesser desselben.

Es ist also

$$i_n \cdot m_n = AW.$$

Es ist ferner

$$i_n = \frac{E}{W_n}$$

und da

$$W_n = \frac{0{,}018 \cdot l_n \cdot m_n}{q},$$

so ist

$$i_n = \frac{E \cdot q}{0{,}018 \cdot l_n \cdot m_n},$$

demnach

$$i_n \cdot m_n = AW = \frac{E \cdot q}{0{,}018 \cdot l_n}.$$

also ist, da

$$q = \frac{\delta_n^2 \cdot \pi}{4}$$

$$\delta_n = \sqrt{\frac{AW}{E} \cdot \frac{0{,}018 \cdot l_n \cdot 4}{\pi}}$$

Mit Rücksicht auf die im Betriebe eintretende Erwärmung des Nebenschlussdrahtes setzen wir der Vorsicht halber

statt 0,018 den Wert 0,02

für den specifischen Widerstand des Kupfers.

Indem wir zu dem von uns zu berechnenden 16 pferdigen Motor zurückkehren, müssen wir uns in erster Annäherung über die Dimensionen der Magnetspulen schlüssig werden, da wir ja sonst auch den Wert $l_n$ nicht berechnen können. Wenigstens für den Wert $x$ müssen wir eine Annahme machen.

Wir setzen

$$x = 7{,}0 \text{ cm},$$

dann ist

$$l_n = 2c + 2b + 2x,$$

$$l_n = 1{,}2 \text{ m}.$$

Daher

$$\delta_n = \sqrt{\frac{0{,}02 \cdot 4 \cdot 1{,}2 \cdot 7750}{\pi \cdot 220}}$$

$\delta_n = 1{,}04$, wofür praktisch

$\delta_n = 1{,}1$ zu nehmen ist.

In isoliertem Zustand soll der äussere Durchmesser 1,4 mm betragen. Nun wollen wir annehmen, dass wir etwa 3 % des Hauptstromes für den Magnetstrom anwenden, also

$i_n = 1{,}8$ Ampère.

Dann beträgt die Windungszahl

$$\frac{AW}{i_n} = \frac{7750}{1{,}8} = 4300,$$

auf **einer** Spule also 2150 Windungen.

Da wir $x = 70$ mm haben, so würden übereinander 50 Windungen Platz finden; es müssten also nebeneinander noch $\frac{2150}{50} = 43$ liegen können; um dieser Forderung reichlich Genüge zu leisten, machen wir

$$y = 70 \text{ mm}.$$

Die abkühlende Oberfläche einer solchen Spule beträgt rund:

$$7 \cdot 162 + 14 \cdot 34 + 14 \cdot 19 + 4 \cdot 49 = 1968 \text{ cm}^2.$$

In der Magnetwicklung ist der Wattverlust

$$1{,}8 \cdot 220 = 390 \text{ Watt}.$$

Die Oberfläche beider Spulen ist rund 4000 $\text{cm}^2$.

Daher Erwärmung der Magnetwicklung

$$335 \cdot \frac{390}{4000} = \text{rund } 33^0 \text{ C}.$$

nach FISCHER-HINNEN, Seite 392 (44).

Da wir nun die Dimensionen der Magnetspulen $x$ und $y$ kennen, so ergiebt sich daraus auch die Breite und Höhe des Motors. Für die elektrischen Beziehungen bietet es kein Interesse, noch weiter auf diese sehr einfache Vervollständigung des ganzen Maschinengerippes einzugehen; es kann allerdings aus Gründen mechanischer Natur — Lagerkonstruktion etc. — nötig werden, für $x$ und $y$ andere Masse zu wählen, um Höhe und Breite des Motors in geeigneter Form zu erhalten; es ist dann nur nötig, das Produkt $x \cdot y$ konstant zu halten, wenn auch die Faktoren desselben sich in ziemlich weiten Grenzen ändern. Wohl können wir zum Schluss noch das Kupfergewicht der Magnetspulen ausrechnen, um einen Vergleich mit dem Folgenden zu haben; dasselbe beträgt:

$$\text{Kupfergewicht} = \frac{4300 \cdot 1{,}2 \cdot 9 \cdot 0{,}95}{1000} = 44 \text{ kg}.$$

Wir wollen nun dieselbe Maschine nochmals untersuchen, wenn sie anstatt des gusseisernen Magnetgestelles ein solches aus Stahlguss erhält (Fig. 20). Wir haben früher festgestellt, dass wir bei Verwendung von Stahlguss mit einer Kraftliniendichte von 15000 arbeiten können; es wird daher der Querschnitt des Mantels auf $^1/_8$ reduziert, während der Querschnitt der Schenkel, in welchem wir bei Gusseisen mit 7000 Linien pro $\text{cm}^2$ arbeiteten, rund die Hälfte des bisherigen betragen wird. Der vordere Querschnitt des Poles, wo er der Ankeroberfläche gegenübersteht, bleibt natürlich derselbe, da einesteils die Polschuhlänge gleich der Ankerlänge werden, andererseits der Wert des Centriwinkels erhalten bleiben muss. Aus alledem folgt also, dass die Manteldicke

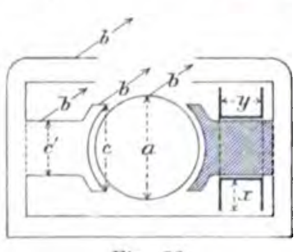


Fig. 20.

$$d = 4{,}4 \text{ cm}$$

und der Querschnitt des Polschenkels da, wo die Magnetspule auf ihm sitzt, etwa 320 $\text{cm}^2$ betragen wird. Machen wir den Polschenkel rechteckig, und

zwar so, dass die der Achse parallele Seite gleich der Ankerlänge wird, so würden wir für die Höhe des Polschenkels den Wert erhalten:

$$c' = 9{,}4 \text{ cm.}$$

Die Folge dieser Konstruktion mit Stahlguss ist ersichtlich, dass, abgesehen von der ausserordentlichen Gewichtsersparnis durch die Reduktion der magnetischen Querschnitte, auch die mittlere Länge einer Magnetwindung kleiner wird. Es ist jetzt

$$l_n = 2\,(c' + b + x)$$
$$= \text{rd. } 1{,}0 \text{ m,}$$

während wir bei Gusseisen erhalten hatten

$$l_n = 1{,}2 \text{ m.}$$

Da wir nun im übrigen an der Ankerkonstruktion nichts zu ändern haben und auch die kleine Verringerung der Weglänge der Kraftlinien im Mantel vernachlässigen können, so müssen wir auch bei dieser Stahlmaschine als totale magnetisierende Kraft erhalten

$$AW \text{ total} = 7750.$$

Wir erhalten nunmehr für den Durchmesser des Nebenschlussdrahtes

$$\delta_n = \sqrt{\frac{0{,}02 \cdot 4 \cdot 1{,}0 \cdot 7750}{\pi \cdot 220}} = 0{,}95 = 1{,}0 \text{ mm rund,}$$

wogegen wir bei Gusseisen einen Draht von 1,1 mm Durchmesser nehmen mussten. Wir werden im übrigen die Spulendimensionen $x$ und $y$ nicht verändern und werden dann finden, dass wir auf beide Spulen zusammen unter der Annahme, dass der Draht von 1,0 mm Durchmesser isoliert einen Durchmesser von 1,3 mm besitzt, 5500 Windungen aufwickeln können. Es würde also der Nebenschlussstrom betragen

$$i_n = \frac{7750}{5500} = 1{,}4 \text{ Ampère.}$$

Dagegen war bei Gusseisen

$$i_n = 1{,}8 \text{ Ampère.}$$

Die Magnetspulenoberfläche ist jetzt rund 3750 $cm^2$, also etwas kleiner geworden als bei Gusseisen; da indessen der Wattverlust in der Magnetbewicklung nur $220 \cdot 1{,}4 = 308$ Watt beträgt, so erhalten wir als Temperaturerhöhung nur

$$P_s = \frac{335 \cdot 308}{3750} = 28^0 \text{ C.}$$

gegen $33^0$ C. bei Gusseisen.

## Prüfung von Gleichstrom-Elektromotoren.

Es ist wohl in allen Dynamo-Maschinenfabriken üblich, das fertiggestellte Fabrikat einer sorgsamen Prüfung zu unterziehen. Ferner ist es in letzter Zeit üblich geworden, nach dem Vorgang des Auslandes, ausgeführte elektrische Anlagen und vornehmlich die Maschinen in denselben durch Sach-

verständige prüfen zu lassen. Begegnet man doch schon bei grösseren Objekten hier und da den Pflichtheften, in welchen bereits von vorn herein seitens eines von dem Besteller beauftragten Sachverständigen Vorschriften über die Ausführung der Maschinen gegeben werden.

Es dürfte infolgedessen an dieser Stelle notwendig sein, sich eingehend über die Prüfung der Elektromotoren zu verbreiten.

Die Hauptprüfung bezieht sich auf die Leistungsfähigkeit des Motors oder besser ausgedrückt darauf, ob er die garantierte Leistung mehrere Stunden hindurch ohne wesentliche Erwärmung hervorzubringen im stande ist. Hier liegt schon ein heikler Punkt: wir sagen „ohne wesentliche Erwärmung". Es hat sich nun im Laufe der Zeit aus der Erfahrung heraus die Annahme gebildet, dass einer derartigen Prüfung einer elektrischen Maschine die Zeit von etwa sechs Stunden zugrunde gelegt werden soll, nach Ablauf welcher Zeit kein Teil des Elektromotors sich um mehr als 40 Grad über die Temperatur der umgebenden Luft erwärmt haben soll. Indessen geht man öfter in der Angabe der Temperatur bis zu 50 Grad, andererseits finden sich auch ausserordentlich schroffe Ansichten, wie z. B. bei der englischen Marine, wo eine Temperatur von 30 Grad noch nicht einmal erreicht werden darf.

Eine Prüfung auf Leistungsfähigkeit eines Gleichstrom-Elektromotors hat infolgedessen, um allen Anforderungen gerecht zu werden, fogendermassen zu geschehen:

Der Motor wird zunächst mit einer Bremsscheibe versehen und durch Federwage oder Pronyzaum auf die entsprechende Leistung gebremst. Selbstverständlich muss hierbei die zugeführte Spannung möglichst genau diejenige sein, mit welcher der Motor späterhin arbeiten soll. Nachdem in dieser Weise festgestellt ist, welche Stromstärke der Motor bei seiner normalen Belastung verbraucht, folgt eine Dauerprobe von sechs Stunden mit dieser der vollen Belastung entsprechenden Stromstärke und der richtigen Spannung. Im Prüfraum einer elektrotechnischen Fabrik wird man kleinere Elektromotoren zweckmässig bei dieser Prüfung dadurch belasten, dass man sie mit kleinen Dynamomaschinen unter einen Riemen setzt.

Grosse Motoren wird man, um die Kosten dieser Prüfung zu verringern, zweckmässig zusammen mit der stromliefernden Dynamomaschine auf dieselbe Transmission arbeiten lassen, um so die durch den Motor auf die Transmission übertragenen Kräfte in der Primärmaschine wieder nutzbar zu machen. Bei einiger Geschicklichkeit gelingt es, beide Maschinen so einzuregulieren, dass irgend welche Gefahr bei diesem Experimente nicht vorliegt, während andererseits die für dieses Experiment aufzuwendenden Kräfte nur durch den Leerlauf und die Verluste des Generators und des Motors beansprucht werden. Unseres Wissens ist diese Art und Weise, grössere Motoren unter Aufwendung der geringsten Betriebskraft zu probieren, zuerst von Herrn Geheimrat Prof. Dr. W. Kohlrausch angegeben worden, der diese Methode auch zuerst in dem elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule in Hannover probiert hat.

Während der Dauer dieser sechsstündigen Probe ist es notwendig, an einem Ampèremeter für den Hauptstrom, einem gleichen Instrument für den Nebenschlussstrom, sowie an einem Spannungsmesser wenigstens halbstündliche Beobachtungen zu machen und dieselben im Protokollbuche übersichtlich zusammenzustellen. Ferner soll noch halbstündlich die Tourenzahl des Motors

festgestellt werden und es ist auch notwendig, die allmählich wachsende Erwärmung der Magnetspulen durch ein von Anfang an an denselben liegendes Thermometer zu registrieren. Auch diese Beobachtung über Tourenzahl und Temperatur der Magnetspulen ist in das Protokollbuch einzutragen.

Kurz vor Beendigung der Dauerprobe ist eine sogenannte Abnahme des Motors zu machen. Dieselbe besteht im wesentlichen darin, dass man bei gleichbleibender Spannung — vorausgesetzt, dass es sich um einen Nebenschlussmotor handelt — die Belastung des Motors allmählich ändert und bei verschiedenen Belastungen etwa vier bis sechs Beobachtungen über Tourenzahl des Motors anstellt und registriert. Hierbei hat man sorgfältig zu kontrollieren, ob bei der Belastungsänderung die Bürsten ruhig bleiben, oder ob es notwendig ist, dieselben etwas zu verstellen. Alle diese Umstände sind im Protokollbuch zu vermerken.

Nun wird die Maschine still gesetzt und sofort mittelst Thermometer die endgültige Erwärmung des Ankers und der Magnetspulen festgestellt. Bei Nutenankern ist es notwendig, die Temperaturmessung zweimal zu machen, einmal für das Eisen und zweitens für die Kupferbewicklung.

Hiermit wäre die Dauerprobe des Elektromotors erledigt.

Die Temperaturmessung durch Thermometer erscheint uns aus vielen Gründen als die einzig richtige. Vielfach wird indessen eine andere Art der Temperaturmessung an den zu prüfenden Elektromotoren angewendet, welche im Folgenden mit ihren Vorzügen und Nachteilen kurz beschrieben werden soll:

Ehe die Maschine zu einem mehrstündigen Probebetriebe in Betrieb gesetzt wird, werden die elektrischen Widerstände der Magnetspulen und des Ankers gemessen. Es geschieht dies in der allgemein üblichen Weise unter Zugrundelegung irgend einer der Methoden für die Messung kleiner Widerstände, am besten nach der Brückenmethode unter Anwendung eines Spiegelgalvanometers.

Die gemessenen Widerstände sowie die Lufttemperatur, bei welcher die Messung stattgefunden hat, werden im Probierbuche vermerkt und nun die Maschine ihrem mehrstündigen Probebetriebe mit voller Belastung überlassen.

Nach Beendigung des Probebetriebes, möglichst schon vor der oben beschriebenen Abnahmeprüfung, wird der Widerstand der Ankerbewicklung und der Spulenbewicklung nochmals gemessen, ebenso die Lufttemperatur.

Die Erhöhung des Widerstandes wird in Prozenten ausgedrückt; aus dieser prozentualen Widerstandserhöhung durch die inzwischen eingetretene Erwärmung lässt sich letztere genau in Graden des hundertteiligen Thermometers ausrechnen, wobei man im allgemeinen annimmt, dass $1\,^0/_0$ Widerstandszunahme gleich ist 2,5 Grad Celsius-Temperaturerhöhung.

Die Vorteile dieser Messung, wenn man letztere rein theoretisch betrachtet und annehmen will, dass dieselbe stets gelingt und zu richtigem Resultate führt, sind darin begründet, dass man die wirkliche Temperatur nicht nur an der Oberfläche der Ankerwicklung oder Spulenwicklung ermittelt, sondern die Temperatur auch im Innern der Magnetspule bezw. des Ankers erkennt; die Temperatur im Innern einer Wicklung ist aber zweifelsohne höher, als die Temperatur an der Abkühlungsverhältnissen ausgesetzten Oberfläche. Hierin würde also ein grosser Vorzug liegen. Aber leider sprechen sehr viele Gründe gegen die Anwendung dieser theoretisch gewiss einwandsfreien Widerstandsmessung. Auf Magnetspulen angewendet, wird

die Temperaturmessung durch Widerstandsmessung im allgemeinen die richtigen Resultate ergeben; bei der Messung von Ankerwiderständen wird indessen sehr selten die richtige Temperatur ermittelt werden und zwar aus einem sehr einfachen Grunde:

Die Messung eines Ankerwiderstandes ist abhängig von dem mehr oder weniger guten Kontakt zwischen den Bürsten und dem Kollektor. Es ist unschwer nachzuweisen, dass durch besseres oder schlechteres Anliegen der Bürsten, durch eine mehr oder weniger eingeschliffene Fläche, namentlich bei Kohlenbürsten, die Messung derartig beeinflusst wird, dass die sich ergebenden Resultate vollständig unzuverlässig sind.

So ist dem Verfasser bei einer amtlichen Abnahme mehrerer vollständig gleicher 100KW-Maschinen passiert, da von Seiten der betreffenden Behörde auf der Anwendung der eben beschriebenen Methode bestanden wurde, dass scheinbar eine Maschine eine Temperaturerhöhung von 40 Grad, eine andere eine solche von vielleicht 8 Grad und eine dritte nach mehrstündigem Probelaufen eine Temperaturerniedrigung um ein ganz Bedeutendes erfahren hatte. Es blieb auch damals nichts anderes übrig, als das Thermometer zu Hilfe zu nehmen.

Einigermassen ist es ja möglich, die Unsicherheit, welche durch den Bürstenkontakt in diese Widerstandsmessung hineingetragen wird, dadurch zu eliminieren, dass man den Ankerwiderstand nicht an den Bürsten, sondern an den entsprechenden Lamellen des Kollektors misst.

Zu diesem Zwecke löst man eine Schraube an der betreffenden Lamelle und klemmt den Messdraht mit unter diese Schraube; das lässt sich natürlich nur durchführen bei Maschinen, bei welchen die Drähte in die Lamellen eingeschraubt sind, während es unmöglich ist, dies bei Maschinen mit verlöteten Kollektoren zu thun.

Während der Probe der Maschine ist sorgfältig auf irgendwelche abnormalen Erscheinungen zu achten und vor allen Dingen der Funkenbildung der Maschine grösste Aufmerksamkeit zu widmen.

Für die Funkenbildung einer Maschine kommen verschiedene Gründe in Betracht, von denen nur die wichtigsten besprochen werden sollen, soweit sie sich auf neue im Laboratorium einer Maschinenfabrik zu prüfende Gleichstrommotore beziehen können.

Der erste Grund kann natürlich eine verfehlte Konstruktion des betreffenden Motors sein; hierüber ist aber in den übrigen Kapiteln bereits soviel auseinandergesetzt, dass wir uns auf die Einflüsse der Ankerrückwirkung hier nicht einzulassen brauchen. Ein häufig vorkommender Grund auch bei neuen, soeben aus der Werkstatt kommenden Elektromotoren, kann eine starke und sofort merkbare und auch in ihrer Ursache erkennbare Funkenbildung hervorrufen: nämlich die Unterbrechung eines Drahtes der Ankerwicklung.

Es kommt bei schlechtem Kupfer vor, dass ein Ankerdraht an irgend einer Stelle bricht, ohne dass der Wickler oder der Löter etwas davon merkt. Ein derartiger Fehler zeigt sich durch eine ausserordentlich starke sprühende Funkenbildung; setzt man den Elektromotor still, so wird man schon bei oberflächlicher Betrachtung des Kollektors zwischen zwei Lamellen die Isolation stark eingefressen finden. Es ist dies dann ein sicheres Zeichen, dass die zwischen diesen beiden Lamellen liegende Windung unterbrochen ist. Derartige Fälle passieren allerdings bei neuen Elektromotoren sehr selten,

sind indessen unter Umständen bei solchen Motoren, welche im Betriebe oft an- und abgestellt werden, umso häufiger, je geringer die Belastung ist, mit welcher der Elektromotor anläuft, und je höher infolgedessen die Tourenzahl, mit welcher der Elektromotor stossweise in Betrieb gesetzt wird.

Für die Funkenbildung giebt es noch weitere Gründe:

Bei Maschinen, deren Kollektoren nicht gelötet, sondern bei welchen die Ankerdrähte in die einzelnen Lamellen eingeschraubt sind, kann es vorkommen, dass im dauernden Betriebe diese Schrauben sich teilweise lockern. Dadurch wird natürlich der Kontakt ein schlechterer, und dies zeigt sich sofort dadurch, dass die Bürsten zur Funkenbildung neigen. Dem Übelstand ist natürlich sofort abzuhelfen, indem die Schrauben nachgezogen werden, was übrigens nach längerer Betriebszeit bei jeder derartig konstruierten Gleichstrommaschine durchaus zu empfehlen ist.

Ein weiterer Grund zur Funkenbildung kann in dem Material des Kollektors begründet sein.

Wenn die Lamellen aus verschieden hartem Material bestehen, so ist es klar, dass dieselben sich im Laufe der Zeit verschieden abnutzen müssen und dass hierdurch die Kollektorperipherie allmählich aus der Kreisform in eine Ellipse übergeht; man sagt, der Kollektor wird unrund.

Es können auch durch zu starke Erwärmung des Kollektors, wenn entweder die Bürstenzahl ungenügend oder der Druck der Bürsten auf den Kollektor zu stark ist, die zwischen den einzelnen Lamellen befindlichen Isolationsstücke heraus quellen. In diesem Fall finden die Bürsten nicht mehr eine Kreisform vor, auf welcher sie schleifen können, ohne ihre Lage im Raum zu verändern, sie werden vielmehr anfangen zu hüpfen und werden durch dieses Hüpfen teilweise soweit vom Kollektor abgehoben werden, dass ein Kontakt nicht mehr vorhanden und daher die Bildung eines Lichtbogens die notwendige Folge ist.

Sehr wichtig in Bezug auf die Funkenbildung ist die Anwendung guter Bürsten. Wenngleich moderne Gleichstrommotore wohl nur noch in seltenen Fällen mit metallischen Bürsten ausgeführt werden, so wollen wir doch auch diese Konstruktion nicht vernachlässigen.

Die Anforderungen, welche an eine Metallbürste gestellt werden müssen, sind von ziemlichem Umfange. Die Bürste soll einen sehr geringen Widerstand besitzen, sehr schmiegsam sein, in verhältnismässig kurzer Zeit sich mit ihrer Schleiffläche der Peripherie des Kollektors anpassen und schliesslich aus einem Material bestehen, welches den Kollektor bei der unvermeidlichen Reibung nicht angreift. Zu dem letzteren Erfordernis muss allerdings das Material des Kollektors selbst und das der isolierenden Zwischenlagen beitragen; denn die beste alle diese Erfordernisse erfüllende Bürste wird schlecht laufen, wenn das Kollektormaterial allzu weich ist oder wenn das isolierende Material zwischen den Lamellen für die Zwecke unbrauchbar ist, indem es sich ungleich abnutzt.

Es ist wohl auf keinem Gebiete der ganzen Elektrotechnik so ausserordentlich viel gesündigt worden und nirgendswo ist der reklamehaften Verwertung unsinniger Ideen derartig Thür und Thor geöffnet, als auf dem Gebiete der Metallbürste. Absolut thörichte Konstruktionen, die den Stempel der Unbrauchbarkeit trotz etwaiger Patente und Musterschutze an der Stirn tragen, sind in den Handel gelangt und haben den betreffenden Fabrikanten

einen guten Verdienst, den betreffenden Besitzern von Dynamomaschinen und Elektromotoren aber viel Schaden gebracht.

Als eine augenblicklich weit verbreitete und vom Verfasser durch Jahre lange Versuche und in den letzten Jahren durch fast ausschliesslichem Gebrauch als allen Zwecken gut entsprechend erkannte Metallbürste ist die (von der Firma Louis Patz in Dresden hergestellte) Dynamo-Blätterbürste (Patent Boudreaux) zu nennen. Diese Bürste besteht aus ausserordentlich dünnen Metallblättchen, über deren chemische Zusammensetzung das Fabrikgeheimnis bewahrt wird. Nur soviel steht fest, dass dem Metalle Zusätze gegeben sind, welche die Wirkung haben, dass die Bürste den Kollektor etwas fettig erhält. Es ist dies ein Vorzug, der eine sehr geringe Abnutzung des Kollektors zur Folge hat. Ausserdem schmiegt sich die Bürste wegen der ausserordentlichen Feinheit der Metallblätter dem Kollektor sehr innig an und vermittelt eine gute Kontaktfläche. Der einzige Übelstand bei dieser Bürste ist, dass sie verhältnismässig schnell verschleisst, doch wäre dieser Übelstand nur zu heben, indem man einen Teil der übrigen Vorzüge der Bürste wieder aufgiebt.

Die Bürste ist vermöge der schmierenden Wirkung nicht brauchbar für Niederspannungsmaschinen, eine Thatsache, die allerdings in diesem Bande des Handbuches nicht weiter interessiert, da wir hier nur von Elektromotoren sprechen. Es sei deshalb nur nebenbei erwähnt, dass Niederspannungsmaschinen etwas unter zehn Volt Spannung nicht gut mit Boudreaux-Bürsten arbeiten, weil die schmierende Wirkung der Bürste immerhin einen kleinen Übergangswiderstand auf dem Kollektor hervorruft. Dieser Übergangswiderstand ist bei Maschinen höherer Spannung absolut zu vernachlässigen, da ein nennenswerter Verlust durch ihn wegen der verhältnismässig geringen Stromstärke nicht entsteht. Bei Niederspannungsmaschinen indessen ist die Stromstärke verhältnismässig hoch und, da die davon abhängende Erwärmung des Kollektors mit dem Quadrate der Stromstärke wächst, so ist unter Umständen eine Kollektorerwärmung bei Anwendung der Blätterbürste zu befürchten.

Ähnliche Bürsten, welche in ihrer Wirkungsweise den eben geschilderten Blätterbürsten der Firma Louis Patz nicht nachstehen, werden auch von der Firma P. Ringsdorff in Essen a. d. Ruhr hergestellt; dieselben besitzen indessen nicht die schmierende Wirkung der Boudreaux-Bürsten.

Das Kollektormaterial bei Anwendung von Blechbürsten kann sowohl Bronze als auch Kupfer sein; bei gut konstruierten Maschinen, welche keine Funkenbildung aufweisen, spielt die Frage gar keine Rolle. Das Isolationsmaterial zwischen den Lamellen des Kollektors soll Glimmer sein. Andere Isolationsmaterialien, wie z. B. Pressspan, Fiber oder gar Asbest sind vollständig veraltet; derartige Maschinen sind zu verwerfen.

Bei Elektromotoren kommt indessen in der Hauptsache die Kohlenbürste in Betracht. Dieselbe hat Vorzüge und Nachteile, und es wollte eine lange Zeit hindurch absolut nicht gelingen, der Kohlenbürste in weitem Masse Eingang zu verschaffen, da man sich über die Bedingungen eines guten Arbeitens dieser Bürste erst durch langwierige praktische Versuche orientieren musste. Die Kohlenbürste soll weder zu weich, noch zu hart sein. Im ersteren Falle schmiert sie und überzieht sehr bald den Kollektor mit einer vollständigen schwarzen fettigen Kohlenschicht und giebt so den Anlass zu starker Funkenbildung. Ist die Kohlenbürste aber zu hart, so schleift sie

sich nicht entsprechend der Peripherie des Kollektors ein und hat ausserdem den Übelstand, dass bei der geringsten Unebenheit des Kollektors Kohlenpartikelchen abspringen, wodurch dann wieder die Schleiffläche der Bürste ungleichmässig und eine unter Umständen sehr starke Glühwirkung erzeugt wird.

Die einzelnen Sorten von Kohlenbürsten, welche im Handel sind, erfüllen sehr selten alle Ansprüche, welche man an sie stellen muss. Auch hier zeichnet sich wieder eine Firma durch die Herstellung ganz vorzüglicher Kohlenbürsten aus; es ist dies die Firma „Le Carbone“ in Frankfurt a. M. Allerdings sind diese Bürsten in ihrer besten Qualiät gut sechsmal so teuer, als andere Fabrikate; sie sind indessen ausserordentlich zuverlässig im Betriebe und halten hohe Stromdichten aus, sodass man einer Bürste von „sechs“ Quadratcentimeter Querschnitt im Dauerbetriebe eine Stromstärke von 30 bis 40 Ampère und bei plötzlichen Überlastungen ruhig das Doppelte zumuten darf.

Das Kollektormaterial bei Kohlenbürsten muss ganz unbedingt gezogenes Kupfer sein. Die Anwendung von Bronze oder von gegossenem Kupfer ist absolut zu verwerfen. Als Isolationsmaterial zwischen den Lamellen kommt nur Glimmer in Frage.

Wir wenden uns nun zu den Gründen, welche eine Erwärmung bei dem Probelaufen der Maschinen über das zulässige Mass hinaus hervorrufen können.

In ersterer Linie kann natürlich die Konstruktion des Motors verfehlt sein.

Bei einer starken Ankererwärmung wäre es ja denkbar, dass entweder die Verluste in der Kupferbewicklung oder aber die Verluste magnetischer Natur im Eisen, vornehmlich in den Zähnen eines Nutenankers zu hohe sind und dadurch eine hohe Erwärmung zur Folge haben. Hier ist eine Nachrechnung natürlich sehr einfach, da die in früheren Kapiteln gegebenen Formeln durchaus zuverlässig sind.

Ferner ist es möglich, dass die abkühlende Oberfläche des Ankers nicht genügt, oder dass die Ventilation aus anderen Gründen zu schwach ist.

Indessen werden diese Gründe wohl seltener eintreten, da ein erfahrener Konstrukteur heutzutage sich bei Konstruktion nicht mehr irren wird; deshalb wird auch eine Spulenerwärmung der Magnete schwerlich aus Gründen einer verfehlten Konstruktiou in die Erscheinung treten.

Es giebt indessen genug Gründe, welche nicht vom Konstrukteur, sondern teilweise von den Lieferanten der Materialien und zum anderen Teile von der Werkstatt abhängig sind.

Es ist sehr wohl möglich, dass die magnetischen Eigenschaften der zur Zusammensetzung des Ankers Verwendung findenden schmiedeeisernen Blechscheiben ungenügende sind.

Die Folgen davon sind oft anormal hohe magnetische Verluste durch Hysteresis, welche wiederum bei Nutenankern infolge der ziemlich hohen Kraftliniendichte in den Zähnen eine ausserordentliche Erhitzung des Ankers zur Folge haben können.

Es fällt gewöhnlich sehr schwer, gerade dieser Wärmequelle auf die Spur zu kommen, und sind dazu genaue Versuche nach verschiedenen Methoden anzuführen.

Gewöhnlich wird von den Lieferanten der dünnen Eisenbleche ein bestimmter Koefficient angegeben, der sogenannte Hysteresisfaktor, unter dessen Zugrundelegung es von vornherein möglich ist, den gesamten Hysteresisverlust eines Ankers zu berechnen.

Das ausserordentliche Verdienst, eine hierfür brauchbare Formel aufgestellt zu haben, hat C. P. STEINMETZ; seine in der „E. T. Z." 1892 in mehreren Heften veröffentlichten Formeln und Untersuchungen gipfeln in folgender Beziehung:

$$\text{„Hysteresisverlust} = \eta \cdot B^{1,6} \cdot \omega \cdot V \cdot 10^{-7} \text{ Watt."}$$

Es bedeutet hierbei die üblich „$\eta$" den Hysteresisfaktor, „$V$" den Eiseninhalt in Kubikcentimetern, „$\omega$" die Periodenzahl und „$B$" die Dichte der Kraftlinien.

Der Koefficient „$\eta$" wird im allgemeinen für gute Bleche von 0,002 angenommen und von den verschiedensten Blechwalzwerken auch garantiert. Im allgemeinen wird man aber gut thun, mit $\eta$ = „0,003" zu rechnen. Je nach der Zusammensetzung und dem Verfahren beim Walzen und Glühen des Bleches kann aber auch ein ganz bedeutend schlechterer Koefficient eintreten. Wie aus der Formel erkenntlich ist, ist der Hysteresisverlust und damit zum grossen Teil die Eisenerwärmung nur einfach proportional dem Koefficienten „$\eta$", dagegen proportional der 1,6sten Potenz der Kraftliniendichte. Es kann daher unter Umständen gerade bei hohen Dichten in den Zähnen von Nutenankern eine ausserordentlich starke Erwärmung die Folge sein.[1])

Ausser den Verlusten durch Hysteresis können aber sehr unangenehme Wärmequellen im Anker von Elektromotoren auftreten durch Foucaultströme. Wir wissen, dass, wenn irgend ein geschlossener metallischer Körper in einem magnetischen Felde sich bewegt, sich in demselben elektrische Ströme bilden werden. Daher bilden sich bekanntlich bei der Dynamomaschine Ströme in der Kupferbewicklung des Ankers, und es würden sich Ströme auch im Eisen des Ankers bilden, wenn dieser Anker aus einem Stück und nicht aus aufeinander geschichteten Blechscheiben bestehen würde.

Im allgemeinen geschieht die Fabrikation von Gleichstromankern nach zwei verschiedenen Methoden: Entweder werden bei Nutenankern die Nuten in den Blechscheiben ausgestanzt und dann die so fertig gestellten Ankerbleche auf die Achse geschoben. Andererseits aber geschieht es auch vielfach, dass kreisrunde Bleche auf die Achse geschoben und zusammengepresst werden, dass dann der Anker in diesem Rohzustand auf eine Drehbank genommen und abgedreht wird, worauf er schliesslich zu einer Horizontalfräsmaschine gelangt, woselbst die erforderlichen Nuten eingefräst werden. Beiden Methoden ist das eine gemeinsam, dass die Blechscheiben unter sich durch dünne Papierscheiben getrennt werden.

Nun liegt es auf der Hand, dass die erstere Methode, vollständig auf dem Wege des Stanzens genutete Bleche zu verwenden, den ausserordentlichen Vorzug haben wird, dass die Trennung zwischen den einzelnen Blechscheiben eine vollkommene und daher die Bildung von Foucaultströmen ausgeschlossen ist. Die andere Methode des Überdrehens und der Bearbeitung

---

1) J. FISCHER-HINNEN giebt in seinem Handbuche, vierte Auflage, auf Seite 397 und 398 zweckmässige Angaben, um die Rechnung mit der obigen Formel für den Hysteresisverlust möglichst wenig zeitraubend zu gestalten; vor allen Dingen dient hierzu die Tabelle der 1,6sten Potenzen der Kraftliniendichte, sodass man die Logaritmentafeln, welche sich seit Einführung des Rechenschiebers in der Starkstromtechnik nur noch selten vorfinden, auch hier zu entbehren in der Lage ist.

Ausserdem ist das Studium der Seiten 54 bis 56 in dem FISCHER-HINNENschen Handbuche zu empfehlen, da auf denselben in sehr klarer Weise und gleichzeitig durch Anfügung von Beispielen das für den Praktiker Wissenswerte über Hysteresisverluste auseinandergesetzt ist.

mit Fräsmaschinen hat aber den ausserordentlichen Vorzug, dass die in dieser Weise hergestellten Ankernuten sehr sauber und korrekt ausfallen und daher sonst unter gleichen Umständen ein solcher Anker mit höherer Leistung ausgenutzt werden kann, als ein aus gestanzten Blechen aufgebauter Anker.

Aber es ist von vornherein klar, dass selbst unter der Anwendung sehr scharfer Drehstähle und sehr scharfer Fräserscheiben es unvermeidlich ist, dass an manchen Stellen durch die übergeschmierten Eisenspäne eine Brücke zwischen einzelnen Ankerblechscheiben über die isolierende Papierzwischenlage hinweg gebildet wird. Die Folgen davon sind naturgemäss Foucaultströme im Eisen des Ankers, und diese Foucaultströme können unter Umständen bei genügend hoher Sättigung des Eisens einen ausserordentlich hohen Betrag annehmen. Der hierdurch verursachte Verlust setzt sich in Wärme um und erhitzt das Ankereisen. In der normalen Fabrikation sind aber thatsächlich die Foucaultströme des Ankers wenig zu fürchten. Eingearbeitete Dreher und vorsichtige Fräser werden es nach Möglichkeit vermeiden, mit stumpfen Werkzeugen zu arbeiten, und daher ist die Gefahr jedenfalls nicht so gross, dass man aus diesem Grunde die durch Stanzen genuteten Blechscheiben vorziehen sollte vor den gefrästen Ankern.

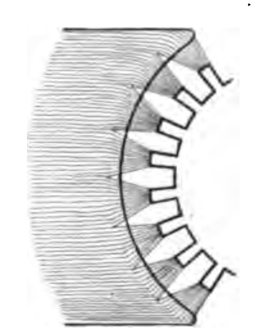


Fig. 21.

Immerhin kommt es beim Probelaufen von Maschinen hin und wieder vor, dass eine eigentümliche Ankererwärmung lediglich den Schluss zulässt, dass ein hochgradiger Verlust durch Foucaultströme vorhanden sein muss.

Die Foucaultströme treten aber nicht blos im Anker auf, sondern sie treten ganz besonders unter günstigen Bedingungen im Eisen der Polschuhe auf. Wenn einerseits elektrische Ströme überall da auftreten, wo ein metallischer Leiter sich im magnetischen Felde bewegt, so müssen dieselben Ströme auch auftreten überall da, wo umgekehrt in einem elektrischen Leiter ein Kraftlinienbündel sich bewegt. Die vom Anker aus auf die Polschuhe eintretenden Kraftlinien stehen nun aber vor allen Dingen bei unseren modernen Nutenankern keineswegs im Raume fest. Schon die einfachste Überlegung zeigt, dass der Übertritt der Kraftlinien von den Zähnen aus und nicht durch die Zahnlücken hindurch erfolgt (Fig. 21).

Die einfache Folge davon ist, da der Polschuh als ein einheitliches Ganzes der gezahnten Ankerperipherie gegenüber steht, dass die Kraftlinien nach dem Polschuh hinübertreten in einer Form, welche etwa parallel-trapezförmig ist. Die Kraftlinien gehen von der Oberkante des Zahnes aus und breiten sich auf ihrem Wege zum Polschuh hin fächerförmig auseinander.

Die von einem jeden Zahne ausgehenden Kraftlinien vereinigen sich mit den Kraftlinien der übrigen unter dem Bereiche eines Polschuhes befindlichen Zähne keineswegs bereits an der Kante des Polschuhes, sondern, wie vorstehende Fig. 21 zeigt, erst etwas entfernt von der Peripherie des Polschuhes. Einen sehr grossen Einfluss hierauf hat natürlich die Breite der Zahnlücken und die Entfernung zwischen Anker und Polschuh. Je breiter die Zahnlücken sind, umso weiter hinein in den Polschuh reichen die getrennten Kraftlinienwege; und je grösser die Entfernung zwischen Anker und Polschuh ist, umso eher vereinigen sich die einzelnen Kraftlinienbündel.

In einem sehr interessanten und ins Einzelne gehenden Aufsatz in Heft 46, Jahrgang 1900, der „E. T. Z." hat Oberingenieur Dettmar von der Firma „Gebr. Körting" zu Hannover diese Beziehungen und ihre weittragende Bedeutung auf die Polschuherwärmung auseinandergesetzt.

Wenn auch diese Beziehungen im allgemeinen bereits bekannt waren, so hat der Verfasser sich doch ein bedeutendes Verdienst durch die mathematische Behandlung der ganzen Fragen erworben und einen Beitrag zu der Vorausberechnung der Ankererwärmung geliefert, der sehr schätzenswert ist.

Bei der Rotation eines Nutenankers werden die Kraftlinien, welche von der Ankerperipherie nach dem Polschuh übertreten, nicht im Raume feststehen, sondern hin und her schwanken und zwar um die Entfernung zweier Zähne voneinander. Diese Bewegung der Kraftlinien in dem metallischen Polschuh muss unweigerlich Foucaultströme von geringerer und grösserer Intensität zur Folge haben und daher eine ausserordentliche Erwärmung.

Dass diese Wärmequelle im allgemeinen bei guten Maschinen selten auftreten wird und vor allen Dingen bisher selten aufgetreten ist, trotzdem die Dettmarschen Veröffentlichungen erst jetzt erschienen sind, beruht wohl darauf, dass auch aus Gründen der Ankerrückwirkung und der Funkenbildung die Konstrukteure bemüht sein müssen, grosse Luftzwischenräume und schmale Nuten anzuwenden.

Die Gründe für Ankererwärmung, welche sich aus der werkstatttechnischen Bearbeitung ergeben, sind hiermit ziemlich erschöpft, wenn wir nicht etwa falsche Ankerwicklung und dergleichen noch besonders aufführen wollen.

Vor allen Dingen kann aber die Spulenbewicklung durch unvorsichtiges Wickeln Anlass zu Kurzschlüssen innerhalb einer Magnetspule bieten; dieser Fall wird bei viereckigen Spulenkästen häufiger vorkommen, als bei den bei modernen Maschinen mehr und mehr zur Verwendung gelangenden runden Magnetspulen.

Ein grosses Gewicht bei der Prüfung der Maschinen im Probierraum ist ferner zu legen auf eine gute Isolation. Die Isolation des Ankers und der Magnetspulenbewicklung gegen den Eisenkörper der Maschine soll vor der Probe, also bei kalter Maschine, und ebenso nach der Probe, also bei warmer Maschine, sorgfältig gemessen werden, und umso sorgfältiger, je höher die Spannung des betreffenden Motors ist. Maschinen von 110 Volt wird man nicht als tadelfrei anerkennen können, wenn sie nicht eine Isolation von 500,000 Ohm mindestens besitzen. Maschinen mit höherer Spannung müssen auch eine entsprechend höhere Isolation haben. Die Isolation des Ankers ist im wesentlichen von dem zur Auskleidung der Nuten und zur Isolierung der Kollektorlamellen verwendeten Isoliermaterial abhängig. Wie früher schon bemerkt, soll zur Herstellung der Kollektorisolation nur reiner Glimmer Verwendung finden. Aber auch zur Auskleidung der Nuten besitzt man jetzt biegsame Glimmerfabrikate in Form von Mikanitleinwand, welche sehr gute Dienste leisten, eine hohe Isolation besitzen und keine Feuchtigkeit anziehen. Natürlich hängt die Isolation des Ankers auch von der Umspinnung des aufgewickelten Drahtes ab. Diese Umspinnung soll mindestens in zwei übereinander befindlichen Lagen vorhanden sein. Sehr gute für die Ankerbewicklung taugliche Drähte fabriziert die Firma „Felten & Guilleaume, Aktiengesellschaft" in Mülheim am Rhein seit mehreren Jahren auf Anregung des Verfassers. Diese Drähte haben eine dreifache Umspinnung mit sehr dünner Baumwolle und sind asphaltiert. Abgesehen von der

Vergrösserung des Isolationswiderstandes durch die Asphaltierung hängen die einzelnen Baumwollfäden dadurch sehr innig zusammen, sodass eine Entblössung des Drahtes von der Isolation absolut ausgeschlossen erscheint. Trotz der reichlichen Umspinnung nimmt der Durchmesser des nakten Drahtes durch die Isolierung nur um 0,5 mm zu. Derartige Drähte hat der Verfasser nicht nur für 110voltige Maschinen, sondern bis zu 5000 Volt hinauf mit bestem Erfolge und ohne Betriebsstörung angewendet.

Oftmals zeigt die Ankerbewicklung einen Isolationsfehler, welcher nicht gerade in direktem Schluss zwischen Kupfer und Eisen, wohl aber in einer ganz bedeutenden Herabminderung des Isolationswiderstandes auf wenige 1000 Ohm besteht und lediglich in dem Vorhandensein von Feuchtigkeit zu suchen ist. Man wird dann gewöhnlich den Versuch machen, durch starkes Erhitzen des Ankers und darauffolgende Abkühlung desselben die Feuchtigkeit hinauszutreiben. Am besten und erfolgreichsten geschieht dies durch eine elektrische Erhitzung dergestalt, dass man etwa die doppelte Stromstärke in den zwischen seinen Polen festgeklemmten Anker hineinschickt und ihn, nachdem er dergestalt bis auf etwa 80° erhitzt ist, unter Entfernung der Keile als Motor zur Abkühlung leerlaufen lässt. Auf diese Weise gelingt es, selbst offenkundige starke Feuchtigkeit durch Wassertropfen oder ähnliche Ursachen zu eliminieren. Im allgemeinen werden auch wohl jetzt in allen Fabriken die von der Wickel-Abteilung fertig gestellten Anker zu einem sogenannten Trockenofen befördert, in dem sie mehrere Stunden möglichst im Vacuum erhitzt werden. Ein sehr geeignetes Verfahren ist, die Anker nach einer solchen Erhitzung zu schellackieren oder mit einem der im Handel befindlichen verschiedenen Isolierlacke zu bestreichen. Die Anwendung dieser Isolierlacke muss indessen mit Vorsicht erfolgen, weil einige derselben trotz sicherlich sehr guter Isolationsfähigkeit die Eigentümlichkeit haben, niemals ordentlich zu trocknen, wodurch dann der Anker immer von einer klebrigen Masse in unschöner Weise überzogen bleibt.

Bei einer Maschinenprobe im Laboratorium kann sich fernerhin herausstellen, dass die Maschine als Elektromotor mit der richtigen Spannung betrieben zu hohe Tourenzahl macht. Hierfür sind vier Gründe möglich:

1) verkehrte Ankerwicklung,
2) falsche Spulenbewicklung,
3) zu grosse Polschuhbohrung und infolgedessen zu grosser Luftraum zwischen Anker und Polschuh

und schliesslich

4) schlechte magnetische Eigenschaften des Gusseisen- oder Stahlgusskörpers.

Eine falsche Ankerbewicklung kann darin bestehen, dass einzelne Spulen verkehrt geschaltet sind oder dass in der Nute zu wenig Drähte liegen. Dieser Grund ist ausserordentlich selten.

Der zweite Grund ist schon häufiger, dass durch Unachtsamkeit nicht die richtige Sorte Nebenschlussdraht angewendet worden ist. Bei Nebenschlusselektromotoren richtet sich aber naturgemäss die Tourenzahl, da sie ja von der Kraftlinienanzahl abhängig ist, nach dem Durchmesser des auf den Magnetspulen befindlichen Drahtes. Ebenso könnte es ja bei Hauptstrommotoren möglich sein, dass infolge Unachtsamkeit auf den Magnetspulen zu wenig Windungen aufgewickelt sind. Es würde dann die Tourenzahl aus leicht begreiflichen Gründen eine zu hohe sein.

Auch der dritte Grund soll, wie die vorangegangenen, in einer regelrechten Massenfabrikation selten vorkommen, dass nämlich die Tourenzahl eines Elektromotors infolge falscher Polschuhbohrung zu hoch oder zu niedrig ausfällt.

Was endlich den letzten Grund betrifft, dass nämlich das Eisen oder der Stahlguss des verwendeten Maschinenkörpers den Annahmen nicht entspricht, welche man in magnetischer Beziehung bei Konstruktion der Maschine zu Grunde gelegt hat, so ist nicht zu leugnen, dass er innerhalb gewisser allerdings geringer Grenzen recht häufig auftritt.

Es ist wohl kaum denkbar, dass verschiedene Magnetgehäuse dieselben magnetischen Eigenschaften in genau gleicher Weise haben können, da ja bekanntlich nicht nur die Zusammensetzung des Materials, sondern auch das Glüh- und Abkühlungsverfahren auf magnetische Permeabilität Einfluss besitzt. Es wird daher nur zufällig gelingen, eine Anzahl sonst ganz gleich ausgeführter Gleichstromelektromotoren mit derselben Tourenzahl zu bauen; vielmehr werden sich immer Unterschiede von 3 bis 5 % ergeben, was natürlich für die Praxis ohne jede Bedeutung ist.

Bei manchen Maschinenproben interessiert den Konstrukteur sowohl als den Abnehmer der Wirkungsgrad des Elektromotors, weshalb wir auch hierüber einiges zu sagen verpflichtet sind.

Es wird von allen Behörden, wenn dieselben als Besteller von Elektromotoren auftreten, ein bestimmter Nutzeffekt oder Wirkungsgrad der Maschine vorgeschrieben, der vom Lieferanten durch eine Probe zu beweisen ist. Indessen nicht nur Behörden stellen diese Forderung; dieselbe wird vielmehr jetzt von vielen Privaten erhoben und zwar mit gutem Grunde.

Unter dem Nutzeffekt oder Wirkungsgrad eines Elektromotors versteht man das Verhältnis der abgegebenen Leistung an seiner Riemenscheibe zu der zugeführten, also verbrauchten elektrischen Energie. Man misst nun zwar die abgegebene Leistung eines Elektromotors in effektiven Pferdestärken, während man die zugeführte elektrische Energie in Watt zu messen gewohnt ist. Es steht indessen nichts im Wege, auch die abgegebene Leistung eines Elektromotors in Watt auszudrücken, indem man wie bekannt die Anzahl der Pferdekräfte mit 736 multipliziert.

Ohne Frage ist von vornherein klar, dass bei dem Umwandlungsprozess aus elektrischer zugeführter Energie in mechanische abgegebene Arbeit Verluste innerhalb des Elektromotors auftreten müssen. Wir kennen alle diese Verluste sehr genau. Sie sind folgende:

1) Energieverlust in der Ankerbewicklung,
2) „ „ „ Nebenschlussbewicklung oder überhaupt in der Magnetbewicklung,
3) Verlust durch Hysteresis,
4) Verlust durch Foucaultströme,
5) „ „ Lagerreibung,
6) Verluste „ Luftwiderstand,

und schliesslich

7) Verlust durch Bürstenreibung.

Fassen wir alle diese Verluste zusammen unter dem Buchstaben $V$, so stellt sich der Wirkungsgrad eines Elektromotors dar, wenn wir mit

„PS“ die Anzahl der abgegebenen Pferdestärken bezeichnen, durch den Quotienten:

$$\frac{PS \cdot 736}{PS \cdot 736 + V}.$$

Der Wirkungsgrad ist infolgedessen ein Dezimalbruch, da natürlich der Nenner grösser ist als der Zähler. Es ist nun notwendig, dass wir uns darüber klar werden, in welcher Weise die einzelnen Verluste zu bestimmen sind, oder besser gesagt, auf welche Art wir in der Praxis die Nutzeffektbestimmung eines Elektromotors ausführen. Die einfachste und beste Methode hierfür, welche auch von fast allen Behörden und von den sehr peinlichen französischen, belgischen und englischen Sachverständigen vorgeschrieben wird, ist die Methode von Swinburne.

Es leuchtet ja ohne weiteres ein, dass man den unter 1) genannten Verlust in der Ankerbewicklung rechnerisch finden kann, wenn man den Ankerwiderstand gemessen hat und die Stromstärke bei voller Belastung kennt. Es ist dann naturgemäss dieser Verlust in der Ankerbewicklung:

$$V_a = J_a^2 \cdot W_a,$$

worin „$W_a$“ den gemessenen Ankerwiderstand bedeutet.

Ebenso bedarf es keines Beweises, dass der Verlust in der Magnetbewicklung bei einem Hauptstrommotor gleich ist:

$$V_m = J_m^2 \cdot W_m$$

oder bei einem Nebenschlussmotor gleich

$$V_m = i_n \cdot E,$$

worin „$J_m$“ den Hauptstrom, „$W_m$“ den Widerstand der Magnetbewicklung eines Hauptstrommotors, „$i_n$“ den Nebenschlussstrom und „$E$“ die Spannung bedeutet.

So einfach nun die vorgenannten rein elektrischen Verluste in der Ankerbewicklung und in der Magnetbewicklung vorausberechnet werden können, so schwierig gestaltet sich Vorausberechnung der magnetischen und der Reibungsverluste. Hier ist es indessen leicht, an Hand des Versuches die Verluste zu bestimmen, indem man den betreffenden Elektromotor mit der richtigen Spannung und der richtigen Tourenzahl unter Einschaltung eines sehr genau zeigenden Strommessers in den Ankerstromkreis laufen lässt. Es ist zweckmässig, den Motor erst wenigstens ein bis zwei Stunden laufen zu lassen, ehe man die am Strommesser abgelesene Stromstärke als richtig anerkennen darf, da vor allem im Anfange des Betriebes die Lagerreibung grösser zu sein pflegt als normal, und auch die magnetischen Verluste bekanntlich bei steigender Erwärmung kleiner werden, was namentlich von den Foucaultströmen zutrifft.

Die nun abgelesene Ankerstromstärke, multipliziert mit der Spannung, giebt den Wert der sämtlichen magnetischen und Reibungsverluste des Motors ganz genau an.

Da dieser ganze Versuch ausserordentlich leicht und einfach zu machen ist und weiter keine besonders feinen Instrumente voraussetzt, als sie schon aus anderen Gründen im Prüfraume von Dynamomaschinenfabriken vorhanden sein müssen, so ist er jederzeit leicht ausführbar.

Die Nutzeffekte von Elektromotoren werden von fast allen Firmen in ihren Preistabellen garantiert. Es hat sich auch in den letzten Jahren herausgestellt, dass die Angaben der grösseren Firmen voneinander nicht sehr abweichen, sodass um so eher anzunehmen ist, dass die Nutzeffekte vollständig richtig sind und dass man mit ihnen in der Praxis rechnen darf. Es kommt ja thatsächlich schliesslich nicht auf ein halbes oder ganzes Prozent des Nutzeffektes an; indessen sind doch grössere Abweichungen von 5 bis 10 % für den Besitzer eines Elektromotors ausserordentlich schädigend, da sie eine Erhöhung der Stromkosten um einen gleichen Prozentsatz darstellen.

Wir wollen indessen an einem Beispiel die SWINBURNE-Methode nochmals erläutern. Dem Beispiel möge zu Grunde gelegt werden ein 50 PS-Elektromotor mit Nebenschlussbewicklung und einer Spannung von 110 Volt.

Sein Ankerwiderstand sei gemessen = 0,0055 Ohm,

ebenso sein Nebenschlusswiderstand = 27,5 „

beides im warmen Zustande.

Der Motor zeigt nach mehrstündigem Leerlaufen eine Ankerstromstärke von 10 Ampère. Wir sind nun vollständig imstande, den Nutzeffekt zu berechnen.

Der Verlust in der Ankerbewicklung beträgt:

$$364^2 \cdot 0{,}0055 = 725 \text{ Watt.}$$

Wir nehmen nämlich als Stromstärke bei voller Belastung 364 Ampère an, was einem Nutzeffekt von 91 % genau entsprechen würde.

Der Verlust in der Magnetbewicklung beträgt, da die Nebenschlussstromstärke = 4 Ampère ist,

$$4 \cdot 110 = 440 \text{ Watt.}$$

Da ferner das Ampèremeter eine Leerlaufstromstärke von 10 Ampère anzeigte, so betragen die magnetischen und Reibungsverluste des Motors:

$$10 \cdot 110 = 1100 \text{ Watt.}$$

Die Summe aller Verluste in dem Motor beträgt daher 2265 Watt.

Sein Nutzeffekt ist daher:

$$\eta = \frac{50 \cdot 736}{50 \cdot 736 + 2265} = \frac{36\,800}{39\,065} = \text{ca. } 93\,\%.$$

Die vorliegendem Zahlen mögen etwas zu günstig angenommen sein, indessen ist es unter besonders günstigen Verhältnissen sehr wohl möglich, einen Nutzeffekt von fast 93 % mit einem 50 PS-Motor zu erreichen.

Wir haben im Vorstehenden in möglichst einfacher Weise und unter Vermeidung allzu komplizierter Beziehungen uns über Schaltungen, über den Entwurf und die Berechnung, sowie schliesslich über die Prüfung von Elektromotoren für Gleichstrom verbreitet und wollen nunmehr zu dem zweiten Abschnitt unseres Themas, den Elektromotoren für mehrphasigen Wechselstrom übergehen.

# B. Drehstrom.

## Allgemeines.

Die dreiphasigen Wechselstrommotoren oder sogenannten Drehstrommotoren verdanken bekanntlich ihre Entstehung dem unausgesetzten Streben der Elektrotechniker, einen brauchbaren Elektromotor für Wechselstrom zu schaffen.

Denken wir uns in die ersten Zeiten der Starkstromtechnik versetzt, so werden wir lediglich der Wechselstrommaschine begegnen. Diese Wechselstrommaschine hat sich sehr lange vermöge ihrer ausserordentlichen Vorzüge gegenüber der Gleichstrommaschine mit ihrem diffizilen Kollektor und Bürstenapparat gehalten, solange die Starkstromtechnik ihr Hauptgewicht auf die Erzeugung elektrischen Lichtes legte und die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Kraft durch Elektromotoren etwas Unbekanntes war.

Indessen sobald der Gleichstrommotor mehr und mehr Eingang in die Praxis erhielt und seine ausserordentlichen Vorzüge vor anderen Motoren, vor den Petroleum- und Gasmotoren vor allen Dingen beweisen konnte, musste die Wechselstrommaschine der Gleichstrommaschine den Vorrang überlassen, da zu der Zeit, als der Gleichstrommotor bereits eine hochentwickelte Maschine war, ein brauchbarer Wechselstrommotor noch nicht erfunden war.

Über die sogenannten Synchronmotoren für einphasige Wechselstrommotoren brauchen wir hier nicht zu sprechen, da dieselben an anderer Stelle des Handbuches behandelt werden. Auch ist nach des Verfassers Ansicht der Synchronmotor nicht eine allen Anforderungen der Praxis entsprechende Lösung der Wechselstrommotorenfrage.

Wem das Verdienst zuzumessen ist, an erster Stelle die Entdeckung des mehrphasigen Wechselstrommotors gemacht zu haben, darüber stritt man sich schon vor Jahren und wird sich um so weniger einigen können, als erfahrungsgemäss derartige Fragen mit fortschreitender Zeit eher verdunkelt, als aufgehellt zu werden pflegen. Thatsache ist jedenfalls, dass fast zu gleicher Zeit in Nordamerika Herr TESLA, in Berlin Herr VON DOLIVO-DOBROWOLSKI und in Frankfurt am Main Herr HASELWANDER die Lösung fanden. mittelst einer eigentümlichen Verkettung von in ihrer Phase verschobenen Wechselströmen Elektromotoren anzutreiben und unter Belastung anlaufen zu lassen.

Die ersten derartigen durch eine Verkettung von zwei in ihrer Phase um 90° verschobenen Wechselströmen angetriebenen Motoren hat ohne Frage TESLA praktisch ausgeführt; bessere mit stärkerer Anzugskraft anlaufende

und durch eine Verkettung von drei in ihrer Phase um 120° verschobenen Wechselströmen betriebene sogenannte Drehstrommotoren waren im Jahre 1891 bereits auf der elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt am Main von der „Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft“ durch deren Chefelektrotechniker DOLIVO-DOBROWOLSKI ausgestellt.

Von dieser Zeit ab hat sich die Elektrotechnik mit grosser Vorliebe gerade in ihren befähigtsten Köpfen dem Studium dieser Motore zugewandt und es in besonders kurzer Zeit dahin gebracht, dass der sogenannte Drehstrommotor den Gleichstrommotoren aus mehr wie einem Grunde vorzuziehen ist.

Natürlich findet das Drehstromsystem, wie dies ja an anderem Orte in diesem Handbuche ausführlicher auseinandergesetzt ist, seine Hauptverwendung für die Verteilung elektrischer Energie über weite Entfernung; hier ist die Möglichkeit geboten, die Fernleitungen mit hochgespanntem Strom zu speisen, während andererseits an den Verbrauchsstellen durch Transformatoren mit sehr wenig Verlust und ohne Betriebskosten der hochgespannte Strom umgewandelt werden kann auf eine gebrauchsfähige Spannung.

Wir wollen nun bei der Betrachtung der Drehstrommotore naturgemäss denselben Weg einschlagen, welchen wir bei dem vorhergegangenen Abschnitte über Gleichstrommotore gegangen sind; wir werden erst die Schaltungen, dann die Vorzüge der Drehstrommotore vor den Gleichstrommotoren betrachten, uns darauf zu dem Entwurf und der Berechnung der Drehstrommotore wenden und schliesslich uns mit der Prüfung von Drehstrommotoren zu beschäftigen haben.

Wir wenden uns demgemäss zu den

## Schaltungen.

Ohne weiteres ist aus dem theoretischen Teile klar, dass man an einem Drehstrommotor zwei Teile zu unterscheiden hat, nämlich den unbeweglichen Teil und den beweglichen Teil. In gewissem Sinne vergleichbar sind diese beiden Teile einerseits mit dem Anker, andererseits mit dem Magnetkörper der Gleichstrommotore. Indessen ist bei Drehstrommotoren die grosse Verschiedenheit hervorzuheben, dass für gewöhnlich in umgekehrter Weise wie bei Gleichstrommotoren der Anker der stillstehende Teil und der Magnetkörper der rotierende Teil ist. Die Analogie hierfür finden wir bei den Wechselstrom- oder Drehstromgeneratoren, bei welchen für gewöhnlich der aussen befindliche Anker feststeht, während das Magnetfeld innerhalb des Ankers rotiert.

Der aussen befindliche Teil des Drehstrommotors wird nun im allgemeinen nicht Anker, sondern Ständer (Stator) nach englischem Vorgange genannt, während die Bezeichnung für das rotierende Magnetfeld „Läufer“ (Rotor) lautet. Hierdurch wird zu gleicher Zeit die Thätigkeit der beiden Teile bestimmt.

Wie einem jeden Motor, so wird auch dem Ständer des Drehstrommotors von einer Leitung, welche beim dreiphasigen Wechselstrom aus drei einzelnen Drähten besteht, Strom zugeführt. Es ergiebt sich aber bei der Betrachtung sofort ein grundlegender Unterschied, indem hier nämlich nur dem Ständer, also dem Anker, Strom zugeführt wird, nicht auch dem Magnet-

system, nämlich dem Läufer. Letzterer, der Läufer, steht überhaupt nicht in Verbindung mit dem Leitungsnetze. Es wird vielmehr in der Bewicklung des Läufers durch den im Ständer verlaufenden Strom ein Induktionsstrom induziert, zu welchem Zwecke die Wicklung in sich selber kurzgeschlossen sein muss.

Schematisch können wir uns den Drehstrommotor durch die nachfolgende Fig. 22 dargestellt denken. Aussen befindet sich ein ringförmiger Ständerkörper, welcher mit einer bestimmten Wicklung, je nachdem es sich um zweiphasigen oder dreiphasigen Wechselstrom handelt, versehen ist.

Innerhalb dieses Ständerringes läuft mit möglichst wenig Luftabstand ein cylinderförmiger Läufer, über dessen Bewicklung wir uns zunächst noch nicht unterhalten wollen.

Vergegenwärtigen wir uns nochmal, was wir uns unter einem zweiphasigen oder überhaupt mehrphasigen Wechselstrom zu verstehen haben.

Wir stellen uns eine Wechselstrommaschine vor, deren Anker eine Bewicklung für einphasigen Wechselstrom trägt. Die Kurve dieses Wechselstroms ist eine Sinuskurve, deren Verlauf jedem bekannt ist.

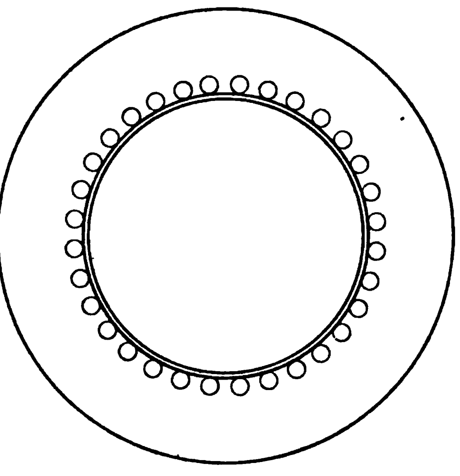


Fig. 22.

Wickeln wir nun auf diesen Anker der Wechselstrommaschine noch eine zweite ganz genau gleiche Ankerwicklung, welche aber auf der Peripherie des Ankers die erste Ankerwicklung nicht bedeckt, sondern den noch freien Platz in der Weise ausfüllt, dass die Windungen der beiden Ankerwicklungen voneinander um 90° entfernt sind, so werden wir zwar aus dieser zweiten Ankerwicklung die gleiche Spannung erhalten, wie aus der ersten; die Sinuskurven werden sich indessen nicht decken, sondern liegen so, dass sie sich um 90° übereinander schieben. Mit anderen Worten, wenn die Wechselspannung der ersten Ankerwicklung ihr Maximum erreicht, so ist die Wechselspannung der zweiten Ankerwicklung gleich Null und umgekehrt. Zur Fortleitung dieses sogenannten zweiphasigen Wechselstromes brauchen wir, wie es auf den ersten Blick erscheint, vier Drähte (Fig. 23). Wir können diesen zweiphasigen Wechselstrom dem Ständer eines zweiphasigen Motors zuführen, wenn der Ständer dieses Motors ebenfalls zwei Bewicklungen trägt, welche räumlich um 90° voneinander verschoben sind. Diese Gradbezeichnung bezieht sich natürlich auf einen zweipoligen Motor; unter Zugrundelegung eines zweipoligen Motors müssen beide Wicklungen um 90° verschoben sein, während selbstverständlich bei einem vierpoligen Motor die Wicklungen um 45°, bei einem sechspoligen um 30° u. s. w. verschoben sind.

Stellen wir nun das Schema eines zweiphasigen Motors auf, so ersehen wir, dass man zur Übertragung nicht vier Drähte, sondern deren nur drei bedarf, da man ohne Frage die beiden Punkte „*b*“ und „*c*“ zusammen-

legen und daher auch die beiden entsprechenden Leitungen vereinigen kann (Fig. 24).

Es sei hierbei noch eines erwähnt. Nennen wir die Spannung, welche an der Bewicklung einer Phase herrscht, „*e*" und zwar mit dem Index „1" bei der einen und mit dem Index „2" bei der anderen Phase, so wird uns bei der Vereinigung der beiden Punkte „*b*" und „*c*" und unter Zugrundelegung einer gemeinsamen Mittelleitung es interessieren, wie gross nun die Spannung zwischen „*ad*" ist. Wenn die in beide Bewicklungen fliessenden Wechselströme nicht nur gleiche Spannungsgrösse, sondern auch gleiche Phasen besässen, so wäre natürlich die Spannung „*ad*" doppelt so gross, wie an jeder einzelnen Phase. Da indessen beide Spannungen zwar gleich gross, aber unter $90^0$ verschoben sind, so tritt das Parallelogramm der Kräfte ein, und es ist die resultierende Spannung in ihrem Grössenwerte gleich der Diagonale eines Quadrates mit der Seite „*e*", also $e \cdot \sqrt{2}$. Es ist auch wohl zu bedenken, dass aus demselben Grunde die Stromstärke in der mittleren Leitung, welche zu den vereinigten Punkten „*b*" und „*c*" führt, $\sqrt{2}$ mal so stark ist, als die Stromstärke in den beiden Aussenleitern. Da nun

$$\sqrt{2} = 1,42,$$

so ist es notwendig, den Querschnitt des mittleren Leitungsdrahtes $42\,^0/_0$ grösser zu machen, als den Querschnitt der beiden Aussenleiter. Wir haben hier also genau das Umgekehrte, wie bei Gleichstrommehrleiter-Anlagen.

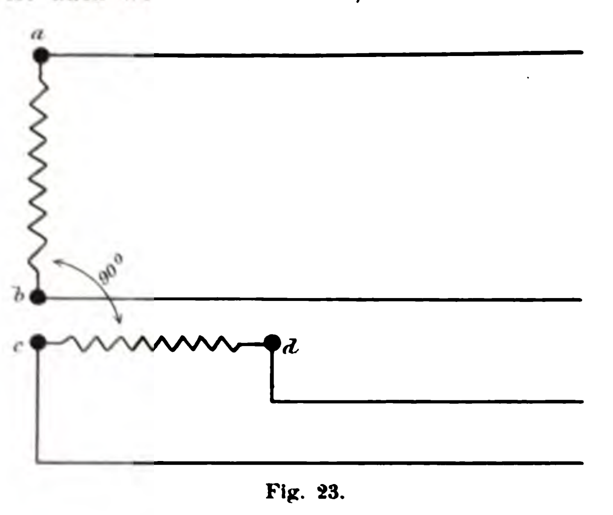


Fig. 23.

Fig. 24 stellt uns nun schematisch die Bewicklung eines Zweiphasenmotors dar, wobei angenommen ist, dass die Punkte „*b*" und „*c*", also die Enden der beiden Phasenbewicklungen, miteinander verbunden sind; man nennt diesen Punkt den „Verkettungspunkt" oder „neutralen Punkt".

In der folgenden Fig. 25 ist eine Kombination von drei Wechselströmen dargestellt, von denen jeder gegen den anderen um $120^0$ verschoben ist. Auch hier ist es möglich, die eigentlich notwendigen sechs Leitungen zur Übertragung der drei Ströme auf drei Leitungen zu reduzieren durch Verkettung der Punkte *d*, *e* und *f*.

Es ist ohne weiteres klar und auch schon im früheren Bande des Handbuches auseinandergesetzt, dass, wenn die Spannung einer Phasenbewicklung „*ad*", „*be*" oder „*cf*" gleich $\varepsilon$ gesetzt wird, dass dann die Spannung zwischen beispielsweise „*ab*" oder „*bc*" oder „*ac*" $= \varepsilon \cdot \sqrt{3}$ sein muss.

Es ist daher nur notwendig, sich zwei um $120^0$ verschobene Komponenten eines Parallelogramms aufzuzeichnen, einer ist davon in umgekehrter Richtung zu zeichnen, sodass scheinbar eine Verkettung von $60^0$ entsteht und dann die resultierende zu konstruieren.

Die nachfolgende Fig. 26 bringt die Darstellung der Bewicklung des Ständers eines zweipoligen Dreiphasenmotors.

Wir weisen umsomehr auf diese Figur hin, als bei der Ausführung solcher verketteten Wicklungen mehrphasiger Ströme häufig selbst von den berufensten Seiten Fehler gemacht werden, wie dies auch ein im Jahre 1900 erschienenes sonst vorzügliches Werk über eine gewisse Klasse von Generatoren, Motoren und Steuerapparaten leider erkennen lässt. Die Fig. 26 zeigt die technische Ausführung der Wicklung bei Dreiphasenmotoren; hier ist jede Phasenbewicklung in zwei einander gegenüberliegende Hälften getrennt und zwar derartig, dass „Folgepole“ entstehen. Bei dieser Bewicklung nun kommt es zu Zeiten vor, dass, wie eben bemerkt, die Verkettung unrichtig ausgeführt wird, sodass ein Dreiphasenstrom von 60° Phasenverschiebung entsteht. Um es zu verdeutlichen, bringen wir im Nachstehenden eine absichtlich falsche Figur (Fig. 27). Der Fehler liegt hier daran, dass die mit „2“ bezeichnete Motorklemme nicht als Anfang einer Phase, sondern als Ende der Phase zu betrachten und dementsprechend an den Verkettungspunkt anzuschliessen ist. Die Figur enthält, wie gesagt, nicht eine Bewicklung für Dreiphasenstrom von 120°, sondern von 60° Phasenverschiebung. — Die technische Ausführung von Ständerbewicklungen war Gegenstand vieler und langwieriger Versuche. Es lag ja zunächst sehr nahe, den Wegen Teslas zu folgen, welcher die innere Peripherie des Ständerkörpers mit Polvorsprüngen versehen hatte. Eine derartige Konstruktion führt jedoch zu keinem Ziele. Die allein jetzt noch übliche Ausführung des Ständerkörpers ist folgende:

Fig. 24.

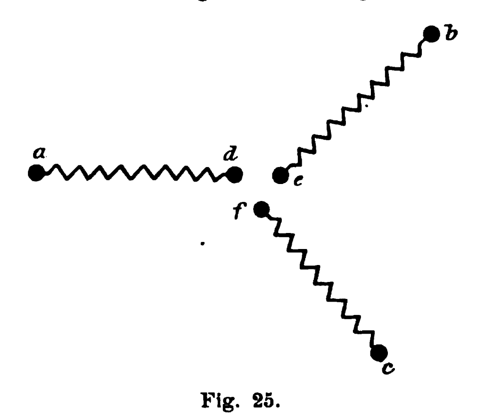



Fig. 25.

Der Ständer ist ein aus Blechringen zusammengesetzter, genau wie ein Wechselstrommaschinenanker aufgebauter Körper. Die Blechscheiben tragen an der Innenperipherie (Fig. 28) Nuten zur Aufnahme der Wicklung. Diese Nuten sind entweder ganz geschlossen oder sie sind nur sehr wenig geöffnet. Beide Konstruktionen haben ihre Vorzüge und ihre Nachteile.

Es ist hier an dieser Stelle notwendig, darauf hinzuweisen, dass der Drehstrommotor und auch, wie wir später sehen werden, der einphasige Wechselstrommotor eine grosse Analogie mit dem Transformator bedeutet. Dem Transformator wird bekanntlich Wechselstrom von einer oder mehreren Phasen zugeführt und zwar seiner Primärwicklung; ebenso wird dem Ständer eines Drehstrommotors Strom zugeführt. Im Eisenkerne des Transformators wird nun ein Magnetfeld wechselnder Form induziert, welches seinerseits in der Sekundärwicklung eine Spannung und, wenn die Sekundärwicklung geschlossen wird, eine bestimmte Stromstärke zur Folge hat. Ebenso wird durch den in der Ständerwicklung eines Motors fliessenden Strom ein wechselndes Magnetfeld erzeugt, und dieses erzeugt in der Läuferbewicklung

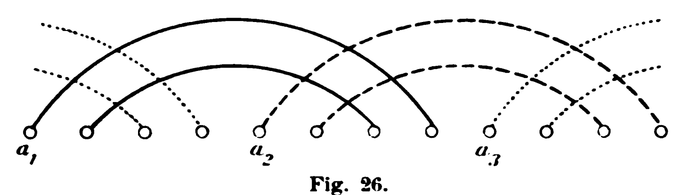



Fig. 26.

eine Spannung und, wenn dieselbe geschlossen ist, eine Stromstärke. Daher können wir sehr wohl sagen, ein Drehstrommotor verhält sich ganz genau wie ein Drehstrom-Transformator, solange er in Ruhe befindlich ist. Der ganze Unterschied zwischen ihm und einem Drehstrom-Transformator beruht darin, dass die Primär- und die Sekundärwicklung, hier also die Ständer- und die Läuferwicklung, nicht auf ein und demselben Eisenkern sitzen, sondern durch einen Luftraum getrennt sind. Dies ist natürlich deswegen notwendig, weil der Motor nicht die Aufgabe der Stromumwandlung wie der Transformator hat, sondern den Zweck verfolgt, dass die Läuferbewicklung rotieren soll und Kraft abzugeben imstande ist. Wie aus der Lehre von

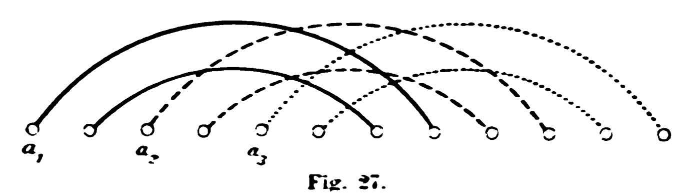



Fig. 27.

den Transformatoren ersichtlich ist, kommt es bei der Konstruktion des Eisengestelles darauf an, durch Verwendung eines geschlossenen Magnetkreises dem Durchgange der Kraftlinie möglichst wenig Schwierigkeiten zu bieten. Es sind deshalb ängstlich alle Fugen soweit thunlich zu vermeiden, damit ein Luftwiderstand nicht vorhanden ist.

Ähnlich liegen die Verhältnisse natürlich beim Induktionsmotor. Hier wird es ebenfalls Aufgabe des Konstrukteurs sein, einen magnetischen Kreis von möglichst grosser Leitfähigkeit zu schaffen. Leider lässt sich aber der Luftraum zwischen Ständer und Läufer nicht vermeiden, wohl aber auf das technisch geringste Mass reduzieren.

Aber nicht nur ein geringer Luftraum ist von nöten, um die Länge der Luftlinien im Luftraume klein zu erhalten, es ist auch notwendig, dass der volle Querschnitt der inneren Peripherie für den Übertritt der Kraftlinien vom Ständer zum Läufer ausgenutzt wird; es sind aus diesem Grunde breit

aufgeschlitzte Nuten am Ständer oder am Läufer zu verwerfen, da naturgemäss die Kraftlinien nur von den Zahnkanten aus übertreten.

Aus dem eben angeführten Grunde müssten natürlich Ständerkonstruktionen bezw. Läuferanordnungen mit geschlossenen Nuten unbedingt den Vorzug verdienen; indessen spricht wieder gegen die Verwendung ganz ge-



Fig. 28. Zweiphasiger Induktionsmotor (Ständer) von Brown, Boveri & Co.

schlossener Nuten der Umstand, dass durch die über der Nute stehen bleibende schmale Eisenbrücke eine Anzahl Kraftlinien einen unrichtigen Weg sich suchen und so für die Induktion verloren gehen. Es entsteht ein sogenanntes Streufeld. Man schlitzt deshalb gern die zunächst als geschlossene

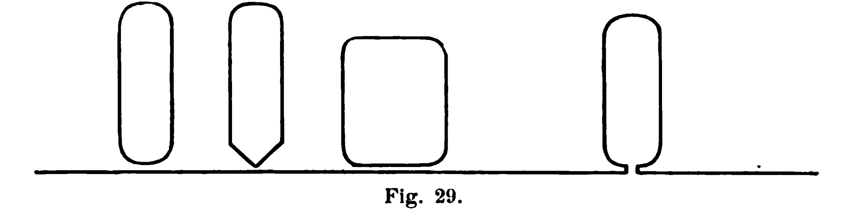


Fig. 29.

Nuten gestanzten Löcher auf, um die Streufelder zu verhindern; bei sehr exakter Fabrikation indessen kann man von dem Aufschlitzen absehen, wenn nämlich die über den Nuten noch stehen bleibende Eisenbrücke so fein und dünn ausfällt, dass sie verhältnismässig nur sehr wenigen Kraftlinien den Durchgang gestattet. Die vorstehende Fig. 29 zeigt einige derartige Anordnungen von Ständernuten oder Läufernuten:

Wir haben oben bei der Besprechung der Bewicklung eines dreiphasigen Wechselstrommotors nur die eine Art der Wicklung kennen gelernt, welche infolge ihrer eigentümlichen Form, wenn man sie schematisch aufzeichnet (Fig. 30): Sternschaltung genannt wird. Wir hatten dabei gesehen, dass die Spannung zwischen zwei Zuführungsklemmen $\sqrt{3}$ mal so hoch ist, als die Spannung an einer einzelnen Phase.

Es ist indessen auch sehr wohl möglich, einen dreiphasigen Induktionsmotor nach folgender schematisch dargestellten Wicklungsart zu schalten, wobei dann die Spannung zwischen zwei Zuführungsklemmen naturgemäss gleich ist der Phasenspannung; wir nennen diese Schaltungsart „Dreiecksschaltung" (Fig. 31).

Da für gewöhnlich alle dreiphasigen Induktionsmotore sechs Zuführungsklemmen erhalten, dergestalt, dass der Anfang und das Ende einer jeden Phasenwicklung je eine Klemme auf der Maschine erhält, ist es möglich, einen Motor für eine bestimmte Spannung „$\varepsilon$", aber auch für die Spannung $\varepsilon \cdot \sqrt{3}$ zu benutzen.

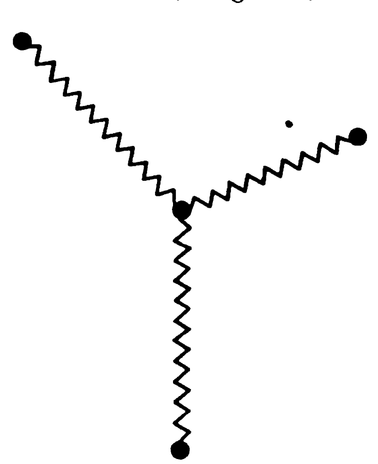


Fig. 30.

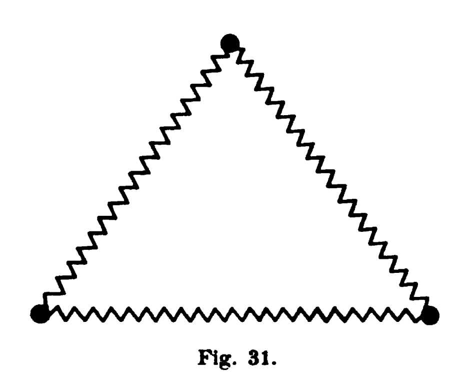


Fig. 31.

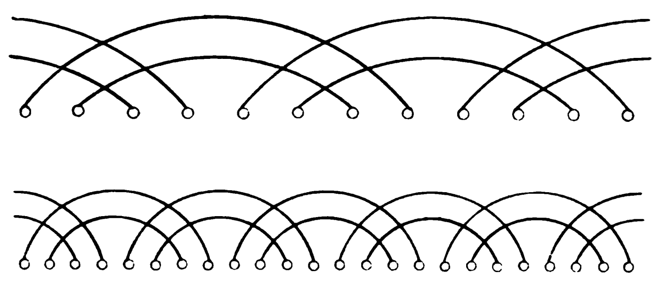
So wird es sicherlich bei grösseren Motoren keiner Firma einfallen, für 110 Volt und für 190 Volt besondere Motore zu bauen, da $190 = 110\sqrt{3}$ ist, woraus man ersehen kann, dass der Motor für beide Spannungen, nur mit verschiedener Schaltungsweise zu benutzen ist. Kleinere Motore wird man allerdings auch für 110 Volt besonders bauen und man wird dabei Sternschaltung zu Grunde legen, da natürlich die Sternschaltung weniger und zwar um $\frac{1}{\sqrt{3}}$ weniger Drähte der Ständerbewicklung ergiebt.

Die folgenden Schemata verdeutlichen in gewisser Reihenfolge eine Dreiphasen-Trommelwicklung für einen zweipoligen, dann für einen vierpoligen und schliesslich für einen sechspoligen Motor, wobei stets die Nutenzahl so gewählt ist, dass sie gleich der Zahl „6" multipliziert mit der Anzahl der Pole des Motors. Daher haben wir gewählt für den zweipoligen Motor zwölf Nuten, für den vierpoligen vierundzwanzig Nuten und für den sechspoligen Motor sechsunddreissig Nuten (Fig. 32).

Die vorstehenden Wicklungsschemata einer Trommelbewicklung sind in derselben Weise ausgeführt, wie sie bei Drehstrom-Generatoren zur Zeit üblich sind. Es sind daher die zu einer Spule gehörigen beiden Windungen jedesmal ineinander eingeschachtelt, sodass zu einer Spule eine lange und

eine kurze Windung gehören, was indessen denselben Effekt hat, als ob beide Windungen gleich lang wären (Fig. 33).

Zu den Nutenzahlen ist es wichtig, folgendes zu beachten, wobei wir nächst vorausnehmend uns klar machen, dass die Läuferperipherie genau in derselben Weise mit Nuten zu versehen ist, wie die innere Peripherie des Ständers. Abgesehen davon, dass die Nutenzahl möglichst hoch begriffen werden soll, weshalb unsere angeführten Trommel - Ankerwicklungen durchaus nicht den Anspruch auf praktische Ausführbarkeit bezüglich ihrer Nutenzahl er-



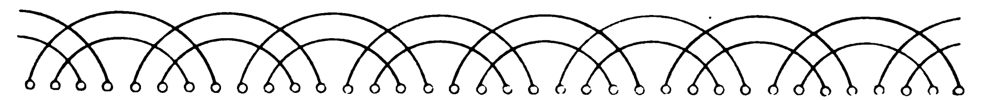


Fig. 32.

heben, ist es noch notwendig, dass die Nutenzahlen sich teilen lassen durch das Produkt aus der Anzahl der Phasen und der Anzahl der Pole und ferner, dass die Nutenzahl des Ständers eine andere, als die des Läufers ist. Möglichst viele Nuten soll der Motor haben, damit die beiden in Betracht



Fig. 33. Dreiphasenmotor von Kolben.

kommenden Peripherien von Ständer und Läufer möglichst gleichmässig unterteilt sind und daher keine Schwankungen in der Kraftlinienzahl und Kraftlinienströmung eintreten.

Die zweite Forderung, dass die Nutenzahlen sich durch das Produkt aus Polzahl und Phasenzahl teilen lassen, zielt ebenfalls auf möglichste Gleichmässigkeit der Wicklung.

Zu der dritten Forderung schliesslich ist zu bemerken, dass ein Motor, dessen Ständer und Läufer dieselbe Nutenzahl aufweisen, eine eigentümliche Neigung zum Nichtanlaufen besitzt. Ein solcher Motor hat das Bestreben, als Transformator im Ruhezustande zu arbeiten, und ist daher als Motor nicht brauchbar, da er ja zumal als dreiphasiger Wechselstrommotor mit höherer Anzugskraft anlaufen soll.

Gebräuchliche Nutenzahlen für Ständer und Läufer sind zum Beispiel die folgenden:

| | | |
|---|---|---|
| bei vierpoligen Motoren: | 36, 48 und 60 | Nuten, |
| „ sechspoligen „ | 54, 72 „ 90 | „ |
| „ achtpoligen „ | 72, 96 „ 120 | „ |

u. s. w.



Fig. 34. Zweiphasenmotor von Brown.

Eines glauben wir noch nötig zu haben zu erwähnen, nämlich die Abhängigkeit der Tourenzahl von der Polwechselzahl des Wechselstromsystems und von der Polzahl des Motors selber.

Ein jedes Wechselstromsystem arbeitet mit einer bestimmten Polwechselzahl, welche sich naturgemäss nach den verwendeten Strom erzeugenden Maschinen richtet. Die Polwechselzahl eines Wechselstrom- oder Drehstromgenerators ist gleich dem Produkte aus der Polzahl des Magnetkörpers und der Tourenzahl der Maschine. Macht ein Drehstromgenerator 300 Touren und hat 20 Pole, so arbeitet das durch ihn beherrschte System mit 6000 Polwechseln in der Minute.

Umgekehrt richtet sich natürlich die Tourenzahl der an dieses System angeschlossenen Induktionsmotore nach der Polwechselzahl und der eigenen

Polzahl, und zwar ist die Tourenzahl eines Motors gleich dem Quotienten aus Polwechsel und Polzahl. Ist der Motor also angeschlossen an ein System mit 6000 Polwechseln und ist er sechspolig gewickelt, so muss er 1000 Touren machen. Dies thut er auch bei Leerlauf, während er bei Belastung in seiner Tourenzahl etwas, nämlich um 4 bis 5 %, zurückgeht, um durch die stärkere Polwechselzahl im Läufer die für die zunehmende Belastung des Motors notwendige höhere Spannung zu erzeugen.

Genau betrachtet ist ja der Vorgang in einem laufenden Induktionsmotor der folgende:

Der stillstehende Ständer arbeitet mit einem Wechselfelde von 6000 Polwechseln; rotiert nun der Läufer leer und wir wollen annehmen, theoretisch

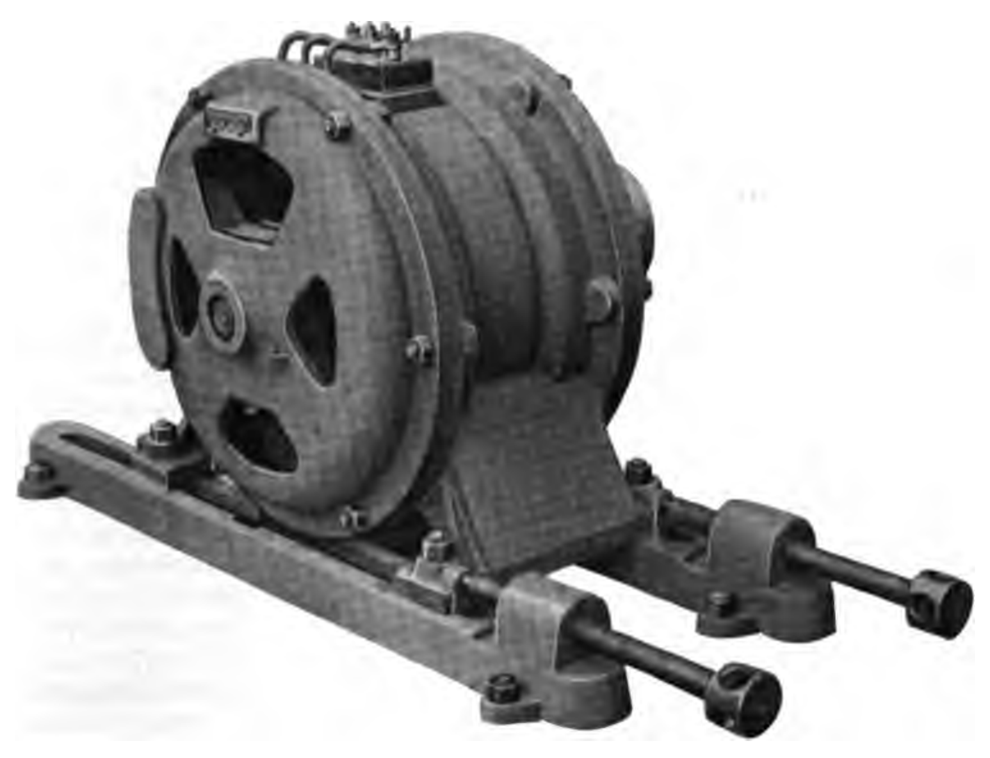


Fig. 35. Induktionsmotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

ohne jeden Leerlauf, sodass er in seiner Läuferbewicklung keine Ströme zu induzieren hat, so ist der Läufer, damit in seiner Wicklung keinerlei Spannung induziert wird, gezwungen so schnell zu rotieren, als das Wechselfeld oder beim Mehrphasenmotor das Drehfeld rotiert, d. h. mit 6000 Polwechseln.

Unter dieser Voraussetzung bewegen sich die Kraftlinien wohl im Ständereisen fortwährend, im Läufereisen indessen stehen sie fest im Raume; es wird daher keinerlei Spannung in der Läuferbewicklung erzeugt und der Motor giebt keine Kraft ab. Jemehr sich nun aber die Belastung eines Induktionsmotors steigert, umsomehr muss in einer Läuferbewicklung Spannung erzeugt werden. Spannung kann indessen nur erzeugt werden, wenn die Kraftlinien im Läufereisen sich bewegen. Dann muss also der Läufer in seiner Tourenzahl etwas zurückbleiben hinter der Tourenzahl des Drehfeldes,

und zwar umsomehr, je höher die in seiner Läuferbewicklung zu erzeugende Stromstärke sein soll.

Wir können uns nun zu der Besprechung der Läuferbewicklung wenden. Wie schon oben angedeutet, wird die Läuferbewicklung genau nach denselben Grundsätzen ausgeführt, wie die Ständerbewicklung.

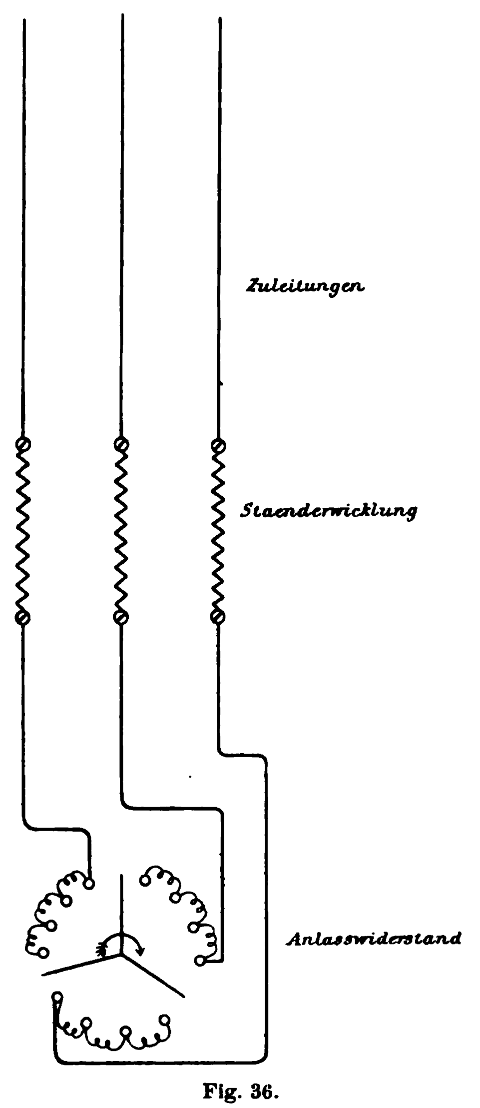



Fig. 36.

Da indessen die Läuferbewicklung einen ganz anderen Zweck hat, als die Ständerbewicklung, da sie vor allen Dingen keine Stromzufuhr von aussen erhält, sondern in sich selbst kurz geschlossen sein soll, so ergeben sich die mannigfachsten Ausführungen für dieselbe.

Für kleine Elektromotoren ist bekanntlich die übliche Ausführung, dass die Nuten an der Peripherie der Läuferblechscheiben rund gestanzt und diese runden Läufernuten durch Kupferstäbe ausgefüllt werden; diese Kupferstäbe werden an beiden Seiten alle miteinander durch je einen Kupferring kurz geschlossen. Es entsteht so der von Dobrowolski zuerst angegebene Käfigläufer. An Betriebssicherheit lässt ein derartiger Läufer nichts zu wünschen übrig, vornehmlich wenn die Verbindung zwischen den Kurzschlussringen und den Kupferstäben des Läufers nicht gelötet, sondern vernietet ist. Eine andere Ausführungsform, welche aber weniger zu empfehlen ist, schliesst gewisse symmetrisch gelegene Kupferstäbe untereinander in der Weise kurz, dass auch bei der Läuferbewicklung drei Phasen sich ergeben. Demgegenüber kann man sagen, dass der Käfigläufer eigentlich so viele Phasen besitzt als er Stäbe hat. Beide Ausführungen werden kurzweg „Kurzschlussläufer“ benannt (Figg. 34 und 35).

Dem grossen Vorzuge der Kurzschlussläufer, welcher in ihrer Einfachheit und Betriebsfähigkeit besteht, steht der grosse Nachteil gegenüber, dass derartige ausgeführte Induktionsmotore nur mit ziemlich erheblichem Stromkonsum anzulaufen imstande sind, da ein zweckmässiger Anlasswiderstand zur Dämpfung des Stromstosses nicht angewendet werden kann. Wohl schaltet man bisweilen einen dreiteiligen Anlasswiderstand vor die Ständerbewicklung (Fig. 36): indessen hat ein solcher vor die Ständerbewicklung geschalteter Widerstand ersichtlich höchstens den Zweck, den Stromstoss mit Rücksicht auf das Leitungsnetz oder mit Rücksicht auf die Primärstation

zu schwächen; für die Betriebsverhältnisse des Motors, vor allen Dingen für das Anlaufen des Motors, ist ein solcher Widerstand nur schädlich, da er das magnetische Wechselfeld des Motors naturgemäss ungünstig beeinflussen muss. Ein sehr deutliches Beispiel mag in folgendem gegeben sein.

Ein derartig geschalteter Widerstand wirkt genau so, als ob man den Anlasswiderstand eines Gleichstromnebenschluss-Motors nicht nur vor dem Anker, sondern zu gleicher Zeit auch vor die Nebenschlussspulen des Motors schaltet. Der Effekt ist bekanntlich dann der, dass der Nebenschlussmotor überhaupt nicht anläuft. So geht es auch hier mit dem Drehstrommotor. Ein solcher geht bei einer derartigen Anlassschaltung allenfalls leer an, während er voll belastet erst dann angeht, wenn der ganze Anlasswiderstand schon ausgerückt ist. Aus diesem Grunde hat also für den Motor selber ein solcher Widerstand gar keinen Zweck.

Es muss bei der Anwendung eines Anlasswiderstandes für Drehstrommotore ohne Frage dafür gesorgt werden, dass der Ständer unter voller Netzspannung stehen kann; es ist daher der Anlasswiderstand nicht vor die Ständerbewicklung, sondern in die Läuferbewicklung einzuschalten. Allerdings ist dies nur möglich unter Aufgabe der idealen Konstruktion des Kurzschlussläufers. Es muss nämlich die Läuferbewicklung nicht in sich kurzgeschlossen sein, sondern sie muss entsprechend ihren drei Phasen zu drei Schleifringen führen; an diese Schleifringe ist unter Vermittelung von stromabnehmenden Bürsten ein dreiteiliger Läuferanlasswiderstand anzuschliessen. Derartige Drehstrommotore laufen tadellos ohne Stromstoss und mit voller Belastung an (Fig. 37). — In der Praxis hat es sich nun eingebürgert, kleinere Drehstrommotore bis zu drei PS gewöhnlich mit Kurzschlussläufer, grössere von fünf PS ab mit Schleifringläufer und Anlasswiderstand auszuführen.

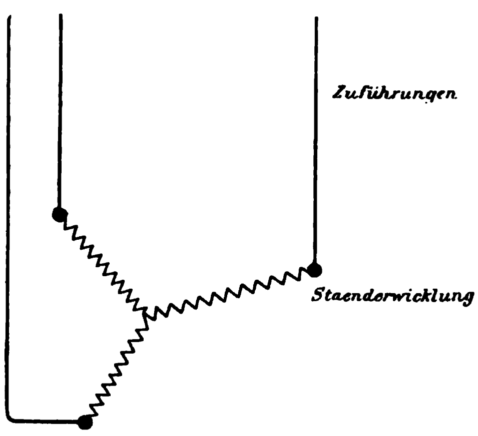



Fig. 37.

Die vorstehende Figur verdeutlicht uns den Anschluss eines dreiphasigen Induktionsmotors mit Anlasswiderstand zwischen den drei Schleifringen der Läuferbewicklung.

Es ist hier der Ort, darauf hinzuweisen, dass die Bewicklung sowohl des Ständers als auch des Läufers in Sternschaltung nicht nur den Vorzug besitzt, dass die Drahtzahl um $\sqrt{3}$ kleiner ausfällt, als bei Dreieckschaltung. Es bietet sich gerade bei der Sternschaltung ein grosser Vorzug für die Einschaltung des Anlasswiderstandes. Man sieht leicht ein, dass der Anlasswiderstand für die Dreieckschaltung bedeutend komplizierter ausfällt, als bei der Sternschaltung. Dies kommt ersichtlich daher, dass das System der Dreieckschaltung keinen neutralen Punkt besitzt. Deshalb ist der Anlasswiderstand in die Zuleitungen einzuschalten und zwar derart, dass sich drei voneinander ganz unabhängige Vorschaltwiderstände ergeben. Dagegen hat die Sternschaltung einen neutralen Punkt, und es ist in den Figuren 36 und 37 gezeigt, wie man diesen neutralen Punkt in den dreiteiligen Hebel

des Anlasswiderstandes verlegen und daher letzteren ausserordentlich einfach gestalten kann. Das eben gesagte überträgt sich ohne weiteres auf die Bewicklung der Läufer, und soviel dem Verfasser bekannt, findet man keine Firma, die es sich einfallen lässt, die Läufer ihrer Drehstrommotore nach der Dreieckschaltung zu schalten, da dann natürlich die Anlasswiderstände ebenfalls sehr kompliziert werden, nicht minder auch die Schleifring-Anordnung des Läufers selbst.

Die Tourenzahlen der Drehstrommotore sind, wie wir bereits oben gesehen haben, abhängig direkt von der Polwechselzahl des Systems, also abhängig von der Tourenzahl der Primärmaschine. Es wird daher auf den ersten Blick schwierig erscheinen, eine Regelung der Tourenzahl bei Drehstrommotoren eintreten zu lassen.

In der That giebt es auch nur drei Möglichkeiten, die Tourenzahl von Drehstrommotoren während des Betriebes zu verändern, und von diesen drei Möglichkeiten sind eigentlich zwei so gut wie ausgeschlossen, da sie in der Praxis zu starken Komplikationen begegnen würden.

Wir können erstens die Tourenzahl eines Drehstrommotors verändern dadurch, dass wir die Tourenzahl seiner Primärmaschine verändern. Genau im gleichen Prozentsatz, wie die Tourenzahl der letzteren sich ändert, ändert sich auch die Tourenzahl des Motors.

Nun wird es aber durchaus nicht zulässig sein, in der Praxis die Tourenzahl einer Drehstromprimärdynamo zu ändern, denn an einer solchen Maschine werden zweifelsohne eine ganze Anzahl von Elektromotoren hängen, ganz abgesehen von der Beleuchtung, und es würden daher erstens die sämtlichen Motore ihre Tourenzahl ändern und ausserdem die Beleuchtungsstärke eine schwankende sein.

Die zweite Möglichkeit beruht darauf, die Bewicklung des Motors von vornherein so einzurichten, dass man seine Polzahl verändern kann. So kann man ja allerdings einen zweipoligen Elektromotor so wickeln, dass man ihn vierpolig, sechspolig und eventuell achtpolig umschalten kann. Abgesehen davon, dass die Wicklung eines solchen Motors sehr kompliziert ist, ist wohl daran zu denken, dass man schliesslich wohl mittelst eines besonderen Umschalters die Pole der Ständerbewicklung zu ändern in der Lage ist, indessen wohl kaum die Polzahl der Läuferbewicklung. Es ist daher diese Möglichkeit nur gegeben bei Motoren mit Kurzschlussanker, also bei verhältnismässig kleinen Maschinen. Die Polzahl eines Motors, dessen Läufer Schleifringbewicklung trägt, kann nicht geändert werden, da alsdann eine Anzahl Schleifringe auf der Achse des Läufers notwendig wäre, was die Sache ungeheuer komplizieren würde.

Indem wir von diesen beiden Möglichkeiten also von vornherein absehen, bleibt nur noch die dritte Möglichkeit, welche allerdings auch wieder nur bei einer bestimmten Sorte von Drehstrommotoren zulässig ist, nämlich bei Motoren mit Schleifringanker, nämlich die Tourenzahl herunter zu drücken durch den Anlasswiderstand. Naturgemäss ist genau wie bei Gleichstrommotoren, deren Tourenzahl man durch Vorschalten von Widerstand vor die Ankerbewicklung herunterdrückt, hiermit ein Verlust verbunden, den man aber gewöhnlich, wenn die Regulierung nur kurze Zeit dauert, eher in den Kauf nimmt, als eine komplizierte Motoranordnung.

Wir gehen nun dazu über, in kurzen Worten die Vorzüge der mehrphasigen Wechselstrommotore, sowie ihre Nachteile gegenüber den weiter oben behandelten Gleichstrommotoren auseinander zu setzen.

Indem wir uns zunächst zu den Vorzügen der Drehstrommotore vor den Gleichstrommotoren wenden, ist es heute bereits festgestellt, dass die Anzugskraft und Überlastungsfähigkeit guter Drehstrommotore diejenige von Gleichstrommotoren ganz erheblich übertrifft. Theoretisch zwar wird dies, wenigstens wenn man Hauptstrom-Gleichstrommotore zum Vergleich heranzieht nicht der Fall sein, sondern es werden sich die beiden Motorarten ungefähr gleich verhalten. Es wird auch ein Hauptstrom-Gleichstrommotor die doppelte Last anzuziehen und auf kurze Zeit durchzuziehen vermögen, ebenso wie man dies heute von einem guten Drehstrommotor verlangt. Indessen täuscht hier die Theorie; in der Praxis wird man wohl beachten müssen, dass ein Gleichstrommotor bei doppelter Überlastung entschieden zu Funkenbildung neigen wird, während ein Drehstrommotor eine Funkenbildung überhaupt nicht aufweisen kann, da er keinen Kollektor besitzt. Es wird also entschieden in der Praxis darauf hinauskommen, dass der Drehstrommotor die grössere Anzugskraft und Überlastungsfähigkeit besitzt.

Ferner ist ein grosser Vorzug des Mehrphasenmotors vor dem Gleichstrommotor der, dass man Mehrphasenmotore für eine bedeutend höhere Spannung zu bauen in der Lage ist, als Gleichstrommotore. Die an dem Stromnetze liegende Ständerbewicklung eines solchen Motors bewegt sich nicht und kann daher für höhere Spannungen benutzt werden, da auf die Isolation ein so ausserordentlich grosser Wert nicht gelegt zu werden braucht. Es sind im praktischen Betriebe bereits Mehrphasenmotore von mehreren 1000 Volt benutzt worden. Demgegenüber ist nicht nur die Bewicklung des Ankers eines Gleichstrommotors an und für sich, sondern auch der Kollektor eines solchen und schliesslich, wie oben zu Anfang unserer Ausführungen bereits auseinandergesetzt worden ist, die Spulenbewicklung ein Hemmschuh für die Anwendung höherer Spannungen. Nebenschluss - Gleichstrommotore für Spannungen von über 500 bis 600 Volt zu bauen, ist ein ausserordentliches Risiko schon allein durch den Induktionsstrom der Spulenbewicklung. Aber auch die Anker selbst grösserer Gleichstrommotore und ihre Kollektoren lassen sich mit absoluter Betriebssicherheit nicht für mehr als 1000 Volt herstellen. Allerdings hat der Verfasser selber einige Gleichstrommaschinen für 2000 Volt früher gebaut, mit einer Leistung von etwa 70 PS, welche sich seit nahezu sieben Jahren im praktischen Betriebe, und zwar täglich während mehrerer Stunden, befinden. Es sind dies aber Maschinen mit Haupstrombewicklung und sie dienen als Primär- und Sekundärmaschine einer sogenannten Hauptstrom - Kraftübertragung. Indessen ist aus einem derartigen Ausnahmefalle gewiss nicht auf die allgemeine Durchführbarkeit höherer Spannung beim Gleichstrombetriebe zu schliessen. Wieviel kleine Mehrphasenmotore von einer Pferdekraft ab laufen aber nicht mit Spannungen von 500 Volt und mehr ohne jede Beanstandung?

Dass die Läuferbewicklung eines Drehstrommotors naturgemäss nichts zu thun hat mit der äusseren Spannung, dürfte von selbst einleuchten. Es ist das eine sehr grosse Annehmlichkeit für eine Specialfabrik, dass sie die Läufer ihrer Drehstrommotore vollständig fertig auf Vorrat fabricieren kann, unabhängig von der späteren Bestellung unter Angabe der Ständerspannungen, während bei Gleichstrommotoren klar ist, dass nicht nur der Anker, sondern

auch die Magnetbewicklung dimensioniert werden muss nach der Spannung, mit welcher der Motor betrieben wird.

Ein fernerer Vorzug von Drehstrommotoren gegenüber Gleichstrommotoren besteht in ihrem geringeren Platzbedarf und demzufolge auch in dem geringeren Gewicht. Da indessen über diesen Punkt die Listen verschiedener Firmen eine erschöpfende Auskunft nicht geben, so wollen wir davon absehen.

Ein Nachteil der Drehstrommotore ist die Unmöglichkeit, in ökonomischer Weise die Tourenzahl zu regulieren, wie wir dies soeben weiter oben besprochen haben. Man wird sich also, wenn diese Forderung im Drehstrombetriebe gestellt wird, durch mechanische Hilfsmittel behelfen müssen.

Wir gehen nun über zu der Besprechung des

## Entwurfes und der Berechnung von Mehrphasenmotoren.

Wir wollen in diesem Kapitel uns zunächst vergegenwärtigen, dass, wenigstens bei uns in Deutschland, der dreiphasige Mehrphasenmotor bedeutend überwiegt und der zweiphasige Induktionsmotor nur in sehr seltenen Fällen, z. B. in einigen Centralen der Firma „Elektricitäts-Actiengesellschaft vorm. Kummer & Co.“, Dresden, angewendet worden ist. Wir wollen daher im allgemeinen unsere Ausführungen auf den dreiphasigen Motor beziehen.

Wir müssen hier erheblich weiter ausholen, als wir seinerzeit bei dem Entwurf und der Berechnung von Gleichstrommotoren nötig hatten. Während die Berechnung von Gleichstrommotoren fast völlig identisch ist mit der Berechnung von Gleichstrom-Dynamomaschinen, so ist dies beim Drehstrommotor durchaus nicht derselbe Fall gegenüber den Drehstrom-Dynamomaschinen. Es ist dies dadurch erklärlich, dass der Motor eben ein Induktionsmotor ist, also nicht mit einem durch Gleichstrom erregten Magnetfelde arbeitet, sondern ein induziertes mehrphasiges Wechselstromfeld besitzt. Die Drehstromdynamo hat eine durch eine Gleichstromquelle erregte Magnetkonstruktion; zur Drehstromdynamo steht der Synchronmotor im selben Verhältnis, wie der Gleichstrommotor zur Gleichstromdynamo.

Wir wollen uns zu Anfang unserer Ausführungen daran erinnern, dass wir schon früher auf die Analogie der Induktionsmotore mit den Transformatoren hingewiesen haben. Wir haben damals die Unterschiede genau klargelegt.

Betrachten wir den Drehstrommotor zunächst in seiner Ausführung mit Schleifringläufer; es wird uns diese Betrachtungsform vieles sofort klar machen, was uns eventuell unklar bleiben würde, wenn wir einen Motor mit Kurzschlussanker zu Grunde legen würden.

Stellen wir uns vor, dass ein Drehstrommotor mit Schleifringanker an die vorschriftsmässige Spannung angeschlossen sei, dass indessen ein Strom in der Läuferbewicklung nicht zu Stande kommen kann, weil entweder der Anlasswiderstand des Läufers ausgeschaltet oder aber die Bürsten von den Schleifringen abgehoben sind.

Es wird dann in der Ständerbewicklung ein gewisser Strom „$i_m$“ entstehen. Es fragt sich, was hat dieser Strom für einen Zweck. Es ist dies ohne Frage die Analogie zu dem Magnetisierungsstrom bezw. dem Leerlaufstrom eines Wechselstrom-Transformators, dessen sekundäre Bewicklung offen

ist, sodass sich ein Arbeitsstrom nicht bilden kann. Wir können also diesen Strom „$i_m$“ als Magnetisierungsstrom des Motors ansprechen. Indessen wird in diesem Magnetisierungsstrom, welcher also das Drehfeld des Dreiphasenmotors hervorbringt, noch ein anderer Strom mit enthalten sein, nämlich der Strom, welcher notwendig ist, um die Hysteresisverluste und die Verluste durch Foucaultströme im Eisen des Motors zu decken. Indessen ist bei gut ausgeführten Motoren der Verlust durch magnetische Reibung und Foucaultströme so gering, dass man diesen Betrag praktisch vernachlässigen kann, umsomehr als dieser Verluststrom sich von dem totalen Strom „$i_m$“ nicht arithmetisch subtrahiert, sondern geometrisch. Bezeichnen wir nämlich den

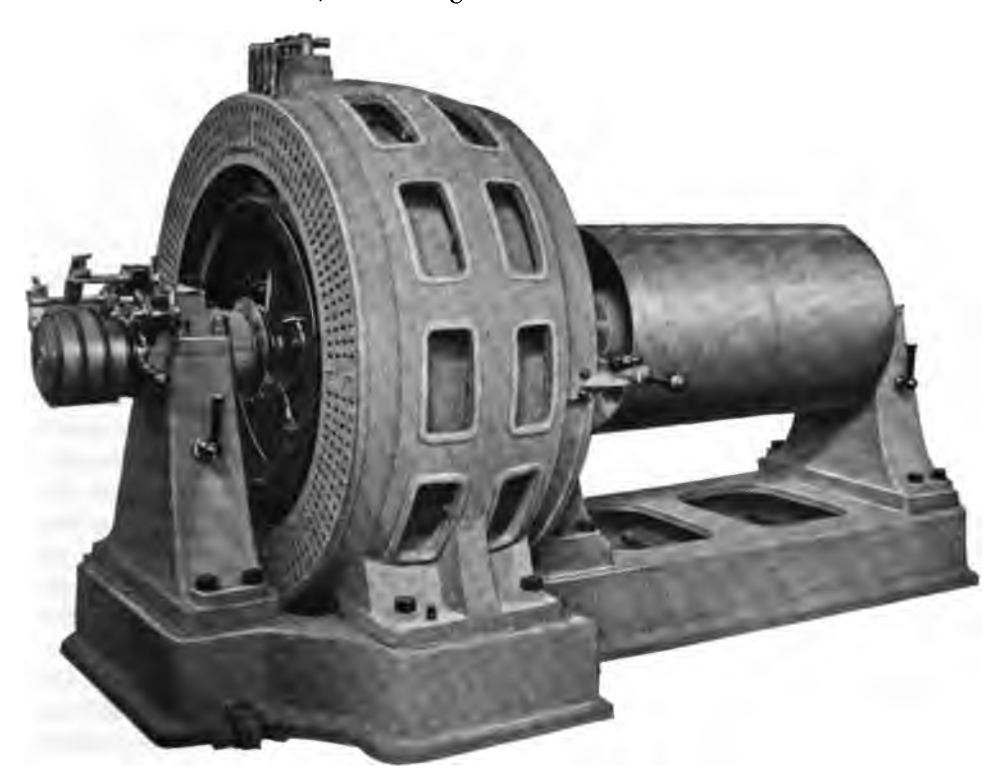


Fig. 38. Induktionsmotor der Maschinenfabrik Oerlikon.

Strom für die magnetischen Verluste mit „$i_h$“ und den gesamten Strom, welchen wir bei unterbrochener Läuferbewicklung messen, mit „$i$“, so ist:

$$i = \sqrt{i_m^2 + i_h^2}.$$

Ein Beispiel dürfte zeigen, wie gering der Einfluss des magnetischen Verluststromes auf den ganzen Wert ist, da der erstere gewöhnlich sehr gering gegenüber dem Magnetisierungsstrom „$i_m$“ ausfällt. Ein Drehstrommotor besitzt z. B. einen Magnetisierungsstrom:

$$i_m = 5 \text{ Ampère}$$

und einen magnetischen Verluststrom:

$$i_h = 2 \text{ Ampère}.$$

In Wirklichkeit werden diese Verhältnisse gar nicht vorkommen, es wird im Gegenteil der magnetische Verluststrom noch viel kleiner sein. Dann ist der gesamte gemessene Strom, welcher sich also aus diesen beiden Teilströmen zusammensetzt, nicht arithmetisch zu addieren, sondern geometrisch; es beträgt daher:

$$i = \sqrt{25 + 4} = \text{ca. } 5{,}4 \text{ Ampère.}$$

Man sieht die ausserordentlich geringe Abweichung um 8 %.

Der Magnetisierungsstrom eines Transformators ist bekanntlich ein wattloser Strom, da er um 90° hinter der Spannung, welche ihn erzeugt, zurückbleibt. Es ist natürlich auch der Magnetisierungsstrom „$i_m$" eines Drehstrommotors ein solcher wattloser Strom. Der in dem Motor selber durch Verluste verbrauchte oder ausserhalb des Motors an seiner Riemenscheibe in Kraft umgewandelte und zur Verfügung stehende Strom ist natürlich phasengleich mit der erzeugenden Spannung und eilt daher dem Magnetisierungsstrom um 90° voran. Alles dies sind genau dieselben Verhältnisse, wie beim Transformator. Solange der Anlasswiderstand des Schleifringläufers nicht eingerückt wird, ist der Drehstrommotor thatsächlich ein Transformator, dessen sekundärer Stromkreis geöffnet ist. Wir können natürlich die Analogie noch weiter treiben, indem wir den Läufer durch Holzkeile im Ständergehäuse festkeilen, sodass er sich nicht bewegen kann. Wir können nun an den drei Bürsten des Läufers durch einen Spannungsmesser die Höhe der in der Läuferbewicklung induzierten Spannung messen. Die Höhe der Läuferspannung richtet sich nach der Höhe der Spannung, an welche der Ständer angeschlossen ist, und nach dem Verhältnis der Windungszahlen des Ständers und des Läufers. Also auch hier liegt die Analogie zwischen Primär- und Sekundärwicklung des Wechselstrom-Transformators vor. Wir können nun thatsächlich aus der festgekeilten Läuferbewicklung Ströme entnehmen, wie man sie aus der Sekundärwicklung eines Transformators entnimmt; wir werden jedoch bei dieser Gelegenheit sehr bald erkennen, dass ein grosser Unterschied noch besteht zwischen Drehstrommotor und Transformator.

Transformatoren zeigen bei steigender Belastung ihrer Sekundärwicklung keinen nennenswerten Spannungsabfall, wenigstens solange sie mit Glühlampen belastet werden. Wollte man indessen einen Drehstrommotor oder überhaupt einen Induktionsmotor in dieser Weise als Tansformator benutzen, dass man seinen Läufer nicht zur Kraftabgabe, sondern in festgekeiltem Zustande zur Stromabgabe gebrauchte, so würde man bei steigender Belastung selbst bei Glühlampenbelastung einen ausserordentlich hohen Spannungsabfall mit steigender Stromstärke zu konstatieren haben.

Aus der Lehre der Transformatoren ist bekannt, wie peinlich der Konstrukteur darauf achten muss, dass alle die von der Primärwicklung erzeugten Kraftlinien auch durch sämtliche Windungen der Sekundärwicklung hindurchgehen; denn nur unter dieser Voraussetzung wird die volle Spannung, welche theoretisch nach dem Verhältnis der beiden Windungszahlen zu erzielen ist, auch wirklich erzielt. Liegen daher z. B. bei einem Transformator ungleiche Spulenschaltungen, nennenswerte Lufträume oder ähnliches vor, so tritt bei steigender Belastung des Transformators, d. h. sobald Strom durch die Sekundärwindungen kreist, eine Streuung der primären Kraftlinien derart ein, dass nur ein Teil derselben auch durch die Sekundärwicklung hindurchtritt. Die Spannung der Sekundärwicklung ist aber naturgemäss

abhängig von der Anzahl Kraftlinien, welche durch sie hindurchtreten, und wenn diese Anzahl Kraftlinien mit steigender Belastung immer geringer wird, so muss auch die Spannung immer geringer werden, welche an den Klemmen der Sekundärwicklung sich zeigt.

Nun ist es sehr wohl möglich, bei Transformatoren durch einen geschlossenen Eisenkern, durch gleichmässige Verteilung von Primär- und Sekundärwicklung und durch vorzügliche Unterteilung der einzelnen Spulen die Streuung fast ganz fern zu halten, sodass bei kleinen und mittelgrossen Transformatoren ein Spannungsabfall in der Sekundärspule durch Streuung kaum nachzuweisen ist. Anders liegen aber die Verhältnisse beim Induktionsmotor. Hier sitzt die primäre Wicklung auf dem Ständer, während die sekundäre Bewicklung des Läufers von der ersteren durch einen Luftraum getrennt ist. Es ist klar, dass die von der Ständerwicklung durch den Magnetisierungsstrom erzeugten Kraftlinien nur zum Teil in die Läuferbewicklung eintreten werden; ein grosser Teil wird auch durch den Luftraum und durch die über den Nuten stehenbleibenden schmalen Eisenbrücken sich schliessen, ohne überhaupt die Ständerbewicklung zu durchdringen. Diese Streuung der Kraftlinien im Induktionsmotor wird um so grösser werden, je mehr der Strom in der Läuferwicklung ansteigt, d. h. je mehr der Motor belastet wird.

Während es nun beim Transformator sehr wohl möglich ist, die Streuung vorher zu berechnen und demgemäss derselben aus dem Wege zu gehen, ist es beim Induktionsmotor lange nicht in gleicher Weise gelungen, die Streuung von vornherein rechnerisch derart festzulegen, dass man mit Sicherheit auf einen bestimmten Streuungsfaktor rechnen könnte. Auch ist die Fabrikation selbst insofern störend für die Berechnung, als ein mehr oder weniger grosser Luftraum zwischen Ständer und Läufer, ein mehr oder weniger starker Eisenspan über den Nuten oder ein schmälerer oder breiterer Schlitz in der halb geschlossenen Nute den Streuungsfaktor ausserordentlich beeinflusst.

Die mit steigender Belastung des Induktionsmotors wachsende Streuung bringt naturgemäss eine Vergrösserung des ursprünglichen Magnetisierungsstromes „$i_m$“ hervor. Die Theorie hierüber ist an anderer Stelle festgelegt worden, sodass wir uns hier auf die Erwähnung des bekannten und berühmten Diagramms von Heyland beschränken können.

Aus dem Heylandschen Diagramm sind in seiner einfachsten Form alle Bedingungen für den Lauf des Induktionsmotors zu erkennen.

Wir wollen indessen bezüglich der Streuungsfaktoren, welche Heyland in die Rechnung eingeführt hat, nicht der Heylandschen Anschauung folgen, sondern derjenigen, wie sie zuerst von Professor Blondel mitgeteilt wurde.

Die Streuung an einem Induktionsmotor wird definiert als eine Erscheinung, welche bewirkt, dass von den durch die Primärwicklung im Ständer erzeugten Kraftlinien nicht alle durch den Läufer gehen, sondern ein Teil seinen Weg durch den Luftraum oder durch den Eisenstreuweg nimmt. Es führt dann das Läufereisen weniger Kraftlinien als das Ständereisen; das Verhältnis beider Kraftlinienzahlen ist:

$$K_l : K_{st} = \sigma_1.$$

Ferner müssen ja auch die bei steigender Belastung des Läufers auftretenden Läuferströme ihrerseits Kraftlinien im Läufereisen erzeugen, welche

wir mit „$K'_l$“ bezeichnen; auch von diesen Läuferlinien geht ein gewisser Teil wieder nicht durch das Ständereisen, sondern durch den Luftraum und den Eisenstreuweg.

Bezeichnen wir andererseits diejenigen Kraftlinien, welche vom Läufer aus in das Ständereisen gelangen mit „$K'_{st}$“, so ist:

$$K'_{st} : K'_l = \sigma_2.$$

Die beiden Koeffizienten $\sigma_1$ und $\sigma_2$, welche allgemein als Streuungskoeffizienten bezeichnet werden, hängen ab von der Dimension des zwischen Ständer und Läufer befindlichen Luftraumes und von der Dimensionierung der Nuten, ob geschlossene Nuten oder halb geschlossene Nuten, ob geringe Eisenbrücke über der Nute, ob schmaler oder breiter Schlitz; ferner hängen die Streuungsfaktoren auch ab von der Kraftliniendichte in den Zähnen, daher allgemein von den Wicklungsarten des Motors.

Diese Streuungskoeffizienten sind im allgemeinen bei gut konstruierten Induktionsmotoren von der Grössenanordnung 0,97 und sind im allgemeinen:

$$\sigma_1 = \sigma_2.$$

Natürlich sind die Streuungskoeffizienten auch abhängig von der Anzahl der in einer Nute befindlichen Drähte und der Stromstärke, welche in diesen Drähten fliesst, also ganz allgemein ausgedrückt, von der Anzahl Ampèrewindungen pro Nute. Je geringer diese Ampèrewindungszahl ist, desto grösser ist unter sonst gleichen Verhältnissen der Streuungskoeffizient; es ist daher bei guten Induktionsmotoren darauf hinzuarbeiten, möglichst viele Nuten anzuwenden. Daher kann es auch kommen, da ja, wie oben bereits bemerkt, die Nutenzahl im Ständer und im Läufer verschieden sein muss, dass die Streuungsfaktoren $\sigma_1$ und $\sigma_2$ doch voneinander eine kleine Abweichung zeigen.

Bezeichnen wir nun kurz den Wert

$$\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{1 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \text{ mit „}f\text{“},$$

so ist „$f$“ ein Mass für den maximal erzielbaren Wert des $\cos \varphi$ des betreffenden Motors; es ist nämlich:

$$\cos \varphi = \frac{f}{2 + f} \text{ maximal.}$$

So wäre z. B. bei einem Elektromotor, dessen Streuungskoeffizienten:

$$\sigma_1 = 0{,}96$$

$$\sigma_2 = 0{,}97$$

gemessen wäre, der maximale Wert des $\cos \varphi$ gleich

$$\frac{13{,}3}{15{,}3} = 0{,}87.$$

Abgesehen davon, dass es Aufgabe des Konstrukteurs ist, die Streuungskoeffizienten so hoch wie möglich zu erhalten und dadurch einen möglichst grossen $\cos \varphi$ zu gewinnen, ist es auch notwendig, dass dieser Wert von $\cos \varphi$, welcher der maximale ist, möglichst in den Punkt der vollen Belastung fällt.

Der cos $\varphi$ ist, wie bekanntlich aus der Lehre von den Transformatoren hervorgeht, das Verhältnis zwischen dem wirklichen Arbeitsstrom des Motors zu dem scheinbar von ihm verbrauchten Strom. Unter Arbeitsstrom ist hier genau wie beim Transformator verstanden derjenige Teil des Primärstromes, d. h. des in der Ständerbewicklung kreisenden Stromes, welcher mit der erzeugenden Spannung in gleicher Phase sich befindet. Dieser Arbeitsstrom ist kleiner, als der Strom, welcher wirklich im Ständer kursiert; denn letzterer, der resultierende Strom, setzt sich ja zusammen aus dem Arbeitsstrom und dem Magnetisierungsstrome; und bei steigender Belastung des Motors ist zu erwägen, dass der Magnetisierungsstrom durch die eintretende Streuung mehr und mehr anwächst.

Diese beiden Ströme, der Magnetisierungsstrom einschliesslich seiner durch die Streuung hervorgerufenen Vergrösserung und der Arbeitsstrom,

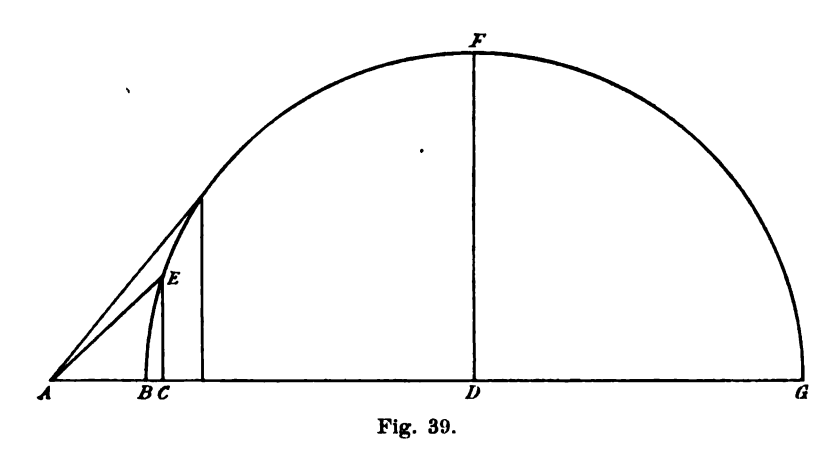


Fig. 39.

liegen um 90° in der Phase auseinander; sie addieren sich also geometrisch unter der Quadratwurzel.

Ihr Verhältnis zueinander, d. h. der Quotient:

$$\frac{\text{Arbeitsstrom}}{\text{resultierender Strom}}$$

wird einfach mit cos $\varphi$ bezeichnet.

Es ist nun ersichtlich klar, dass die Erhöhung des Arbeitsstromes durch den Magnetisierungsstrom, wenn sie auch schliesslich bei guten Motoren nur 10 bis 15 % beträgt, doch immerhin den Nutzeffekt des Motors durch den grösseren Verlust in der Kupferwicklung und auch durch den grösseren Verlust in der Leitung ungünstig beeinflusst.

In eleganter Form führt nun das Diagramm Heyland diese ganzen Beziehungen trigonometrisch vor (Fig. 39).

Es ist „$AB$“ der entweder bei absolutem Leerlauf des Motors oder bei abgehobenen Bürsten des Läufers gemessene Ständerstrom d. h. der bei Leerlauf vorhandene Magnetisierungsstrom, da man ja, wie oben auseinander gesetzt, den magnetischen Verluststrom ruhig vernachlässigen kann.

Es ist ferner „$BD$“ der Radius eines Kreises gleich

$$0{,}5 \cdot AB \cdot f.$$

Um „*BD*“ berechnen zu können, muss man daher „*f*“ kennen. „*f*“ ist aber gleich

$$\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{1 - \sigma_1 \cdot \sigma_2},$$

wie bereits oben gezeigt, d. h. wir müssen, um „*BD*“ berechnen zu können, die Streuungskoeffizienten kennen. Die Ermittelung der Streuungskoeffizienten an einem Drehstrommotor ist nun verhältnismässig sehr einfach.

Stellen wir uns wieder vor, dass unser Drehstrommotor mit Schleifringläufer, aber abgehobenen Schleifbürsten, unter Spannung gesetzt wird. Dann muss die Spannung an den Schleifringen der Läuferwicklung zur Spannung, an welche die Ständerbewicklung angeschlossen ist, im selben Verhältnisse stehen, wie die Anzahl der im Ständer pulsierenden Kraftlinien zu der Anzahl der im Läufer pulsierenden Linien, vorausgesetzt, dass die Windungszahlen im Ständer und auf dem Läufer gleich sind. Letztere Annahme trifft natürlich nie zu, doch wollen wir es der Einfachheit halber zunächst so annehmen. Ist keine Streuung vorhanden, so müssten wir natürlich an den Schleifringen der Läuferbewicklung genau dieselbe Spannung haben, wie es die Primärspannung ist. Nun haben wir aber eine gewisse Streuung beim Induktionsmotor, und diese wird sich bemerkbar machen dadurch, dass wir an den Schleifringen etwas weniger Spannung haben werden, ganz entsprechend der etwas geringeren Zahl der Läuferkraftlinien. Auf diese Weise ermitteln wir den Streuungsfaktor und zwar zunächst den Streuungsfaktor $\sigma^1$ für die Streuung vom Ständer auf den Läufer.

In derselben Weise legen wir jetzt die Läuferwicklung an eine passende Drehstromquelle und messen die nun in der Ständerbewicklung induzierte Spannung. Auf diese Weise wird der Faktor $\sigma^2$ ermittelt.

Sind nun wie immer die Windungszahlen der Ständer- und Läuferbewicklung ungleich, so ist dies natürlich in der entsprechenden Weise zu kompensieren, da natürlich die sekundäre Spannung zur primären sich verhält, wie die sekundäre Windungszahl zur primären Windungszahl.

Diese Streuungsmessungen müssen mit sehr feinen Instrumenten gemacht werden, und es ist eine Stromquelle von ausserordentlicher Konstanz der Spannung hierbei Voraussetzung.

Nachdem wir nun ausser dem Magnetisierungsstrom „$i_m$“ auch die beiden Streuungsfaktoren $\sigma^1$ und $\sigma^2$ gefunden haben, können wir das ganze HEYLANDsche Diagramm konstruieren. Wir tragen die Strecke $AB =$ „$i_m$“ auf und in ihrer Verlängerung über „*B*“ hinaus $BD = 0{,}5 \cdot AB \cdot f$; wir schlagen um „*D*“ einen Halbkreis mit *BD* als Radius und errichten in „*D*“ auf „*BD*“ ein Lot, welches die Peripherie des Kreises in „*F*“ schneidet. Nun können wir in beliebiger Weise von irgend einem Punkt der Peripherie des linksseitigen Quadranten zwei Linien ziehen; nämlich erstens von irgend einem Punkt der Peripherie nach „*A*“ und zweitens von demselben Punkte der Peripherie ein Lot fällen auf die Grundlinie „*AD*“. Nehmen wir an, diese Konstruktion wäre von dem Punkte „*E*“ der Peripherie ausgeführt und das Lot hiesse „*EC*“, dann ist „*EC*“ bei einer bestimmten Belastung der Arbeitsstrom, während „*EA*“ bei derselben Belastung der resultierende Strom ist; daraus geht hervor, dass „*EC*“ dividiert durch „*EA*“ $= \cos\varphi = \cos$ des Winkels *EAC* ist. Es ist daher der Winkel *EAC* bestimmend für die Güte des Motors in Bezug auf den $\cos\varphi$; je grösser der Winkel *EAC* ist,

d. h. je mehr er sich $90^0$ nähert, je mehr daher die beiden Linien $EA$ und $CE$ die Neigung haben, parallel zu laufen, umso kleiner ist die Phasenververschiebung des Motors.

Es soll ungefähr sein:

| | | |
|---|---|---|
| bei Motoren bis | 1 PS | $\cos\varphi = 0{,}8$ |
| „ „ „ | 5 PS | „ $\varphi = 0{,}85$ |
| „ „ „ | 10 PS | „ $\varphi = 0{,}88$. |

Darüber hinaus ist möglichste Annäherung zu erstreben an den allerdings sehr schwer erreichbaren Wert $\cos\varphi = 0{,}9$.

Es ist interessant, sich klar zu machen, dass für den $\cos\varphi$ bezw. für dessen erreichbare Grösse bei einem bestimmten Motor nichts anderes massgebend ist, als ganz allein nur die beiden Streuungskoeffizienten. Es geht dies aus der oben angeführten Beziehung hervor:

$$\frac{f}{2+f} = \cos\varphi \text{ im Maximum.}$$

Es kann daher sehr wohl berechnet werden, wenn man von vornherein bei der Konstruktion eines Motors sich vornimmt, einen bestimmten $\cos\varphi$-Wert zu erreichen, welche Streuungskoeffizienten der Motor mindestens haben muss, um zu diesem Ziele zu gelangen.

Es ist nämlich ohne Frage $\cos\varphi \cdot 2 + \cos\varphi \cdot f = f$,
daher also

$$f = \frac{2 \cdot \cos\varphi}{1 - \cos\varphi}.$$

Nun könnte man weiterhin, da es sich in der Regel doch weniger ganz streng um die genauen Werte der beiden Streuungskoeffizienten handelt, sondern mehr um ihren Mittelwert, die Annahme machen, dass:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$$

sei. Es ist dann:

$$f = \frac{\sigma^2}{1 - \sigma^2}$$

daher ist:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{\sigma^2} - 1}$$

daher ist ferner:

$$\frac{1}{\frac{1}{\sigma^2} - 1} = \frac{2 \cdot \cos\varphi}{1 - \cos\varphi}$$

also:

$$\frac{1 - \cos\varphi + 2\cos\varphi}{2\cos\varphi} = \frac{1}{\sigma^2}$$

folglich:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\cos\varphi}{1 + \cos\varphi}}.$$

Wenn wir also den Wert von $\cos\varphi = 0{,}9$ bei einem Motor zu erreichen beabsichtigen, so werden wir naturgemäss uns die Frage vorlegen müssen,

wie gross muss im Mittel der Streuungskoeffizient sein, damit die Bedingung erfüllt werden kann.

In diesem Falle, wo gefordert wird:

$$\cos \varphi = 0,9$$

wird:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,8}{1,9}} = \text{circa } 0,975.$$

Mit einem Mittelwerte der Streuungskoeffizienten von etwa 0,975 müsste also ein $\cos \varphi$ von 0,9 erzielbar sein.

Zurückgehend zu dem in der vorigen Figur gegebenen „Diagramm von HEYLAND“ bemerken wir uns noch folgendes:

Die Linie „$Ab$“ stellt bekanntlich den Magnetisierungsstrom „$i_m$“ des Motors bei Leerlauf dar. Wie auseinandergesetzt, hat die mit steigender Belastung des Läufers eintretende Streuung die Folge, dass sie den Magnetisierungsstrom vergrössert. Wir hatten dies oben auseinandergesetzt.

Im HEYLANDschen Diagramm sieht man nun diese Vergrösserung des ursprünglichen Magnetisierungsstromes „$AB$“ sehr deutlich. Denn wenn wir das Verhalten des Motors in dem Augenblicke kritisieren, wo sein Arbeitsstrom $= EC$ und sein resultierender Strom $= EA$ ist, so hat sich sein Magnetisierungsstrom bereits erhöht von $AB$ auf $AC$. Diese Anschauung lässt sich ja auch ohne weiteres trigonometrisch verteidigen, da der Arbeitsstrom und der wattlose Strom unter $90^0$ verschoben sein müssen und sich zusammensetzen zu einem resultierenden Strom. Dies geht aber deutlich aus dem Diagramm von HEYLAND hervor.

Aus dem Diagramm geht aber noch mehr hervor. Es ist ersichtlich, dass die grösste Arbeitsstromstärke durch den Radius des Halbkreises $FD$ gemessen wird. Dieser Radius des Halbkreises ist ja bekanntlich wie oben festgelegt:

$$FD = 0,5 \cdot i_m \cdot f.$$

Dieser Radius stellt uns daher denjenigen Strom dar, welcher der höchsten Leistung des Motors entspricht; er ist also ein Mass für die Überlastungsfähigkeit des Drehstrommotors.

Ebenso wie man sich bestrebt, den $\cos \varphi$ so hoch als möglich zu machen, ebenso wird man auch darauf bedacht sein, die Überlastungsfähigkeit eines Drehstrommotors, d. h. also den Radius seines Halbkreises, möglichst gross zu machen, natürlich ohne dadurch andere Beziehungen des Motors zu verschlechtern, was besonders beim $\cos \varphi$ der Fall sein könnte, und ohne den Motor zu teuer zu machen.

Während der $\cos \varphi$ im Maximum nur abhängig war von den Streuungskoeffizienten, ist die Überlastungsfähigkeit eines Drehstrommotors abhängig nach der eben wiederholten allgebraischen Beziehung von den Streuungskoeffizienten und eigentümlicherweise von dem Magnetisierungsstrom. Dies ist ein Fingerzeig dafür, wie man bei der Konstruktion von Drehstrommotoren vorzugehen hat. Im allgemeinen wird man die Motoren so bauen, dass sie die doppelte Belastung noch durchzuziehen vermögen, ohne stehen zu bleiben. Hierfür wird es genügen, bei richtiger Wahl der Streuungskoeffizienten, wenn man den Magnetisierungsstrom zu etwa 25 bis $35\,^0/_0$ des bei voller Belastung resultierenden Stromes annimmt.

Bei Motoren indessen, bei welchen eine ausserordentlich hohe Überlastungsfähigkeit, wenn auch nur für Augenblicke, gefordert wird, wird diese Möglichkeit sich erreichen lassen durch einen anormal hohen Magnetisierungsstrom, allerdings mit Verzicht darauf, dass der maximale Wert des $\cos\varphi$ in den Bereich der normalen Belastung fällt.

Ohne Weiteres kann man aus den ganzen Beziehungen bezüglich des Magnetisierungsstroms die folgende Gleichung festlegen:

$$i_m = \frac{4}{f} \cdot \text{normaler Arbeitsstrom},$$

wenn doppelte Überlastungsfähigkeit gefordert wird.

Nun soll andererseits der maximale $\cos\varphi$, der zu gleicher Zeit in den Bereich des normalen Arbeitsstroms fallen soll, so hoch wie möglich sein. Wir wollen daher $f$ zu etwa 16 annehmen:

Wir erhalten dann bei $f = 16$:

$$\cos\varphi \text{ im Maximum} = 0{,}89.$$

Wir erhalten ferner:

$$i_m = \frac{4}{16} \cdot \text{normaler Arbeitsstrom} = 0{,}25 \cdot \text{normaler Arbeitsstrom}.$$

Hieraus erkennen wir also, dass schon bei $25\,^0/_0$ des normalen Arbeitsstroms für den Wert von „$i_m$“ unter zu Grundelegung eines Wertes von $f = 16$ eine doppelte Überlastungsfähigkeit erreicht wird.

In derselben Weise könnten wir uns bequem ausrechnen, welchen Magnetisierungsstrom wir nötig haben, um dreifache bezw. vierfache Überlastungsfähigkeit zu erzielen.

Ehe wir dazu übergehen, einige praktische Fälle durchzurechnen, müssen wir noch eines nachtragen bezüglich der Prüfung der Drehstrommotore.

Es lassen sich naturgemäss die Streuungskoeffizienten bei der Prüfung der Motore in der weiter oben beschriebenen Weise nur ermitteln bei Drehstrommotoren mit Schleifringankern, da diese Methode ja darauf beruhte, die durch Streuung verloren gehenden Kraftlinien durch den prozentualen Unterschied der Spannung an den Klemmen des Ständers und der Spannung an den Schleifringen des Läufers zu ermitteln. Wenn der Motor indessen einen Kurzschlussanker besitzt, so ist die Möglichkeit dieser Bestimmung ausgeschlossen.

Indessen auch dann können wir durch eine andere Methode die Streuungskoeffizienten ermitteln; wir brauchen sie indessen gar nicht zu ermitteln, sondern können das Heylandsche Diagramm, auf welches es ja doch nur allein ankommt, bequem ohne Ermittelung der Streuungskoeffizienten konstruieren.

Verlängern wir nämlich die Linie $AD$ im Heylandschen Diagramm über „$D$“ hinaus bis „$G$“, dem Schnittpunkte mit der Peripherie, so ist augenscheinlich $AG$ der Kurzschlussstrom bei normaler Spannung und fest gebremstem Kurzschlussläufer.

Dieser Kurzschlussstrom lässt sich durch den Versuch im Laboratorium ermitteln, am bequemsten dadurch, dass man den Läufer des Motors festkeilt und nun eine Reihe von verschiedenen Beobachtungen macht über die Zusammengehörigkeit von Spannung und entsprechender Kurzschlussstromstärke,

wobei man die Spannung allmählich steigert. Es ist hierbei gar nicht nötig, bis auf den normalen Wert der Spannung hinaufzugehen. Wenn man dies vermeiden will wegen der immerhin für den Motor etwas gefährlichen Kurzschlussstromstärke, so genügt es, in einigen Punkten eine Kurve aufzunehmen, deren Koordinatenachsen die Spannung bezw. die Kurzschlussstromstärke darstellen. Man wird finden, dass eine solche Kurve eine gerade Linie ist; es lässt sich daher die Kurzschlussstromstärke bei jeder beliebigen Spannung durch Verlängerung der Geraden ermitteln. Man sucht sich nun die zu der normalen Spannung gehörige Kurzschlussstromstärke und trägt sie als Linie $AG$ auf. Von der Linie $AG$ trägt man ein Stück $AB$ ab, teilt $BG$ in $D$ und schlägt um $D$ das Kreisdiagramm. Diese Untersuchung von Drehstrommotoren auf Grund einer Kurzschlusskurve ist erheblich leichter und weniger mühsam, als die Messung der Streuungskoeffizienten, weswegen man sie auch fast ausnahmslos im Prüfraume derjenigen Fabriken, welche Drehstrommotore fabrizieren, antrifft.

Wir wenden uns nunmehr zu der Berechnung einiger praktisch ausgeführter Drehstrommotortypen.

Kleiner Drehstrommotor des Verfassers für 110 Volt, 1 PS, 1500 Touren, 50 $\sim$.

Die Dimensionen desselben gehen aus der beigefügten Figur 40 hervor. Es ist demnach der

Läuferdurchmesser = 18,0 cm
die Läuferlänge = 6,0 „
der zweiseitige Luftraum $2\delta = 0,1$ cm.

Der Motor ist vierpolig zu berechnen, bei seiner Kleinheit natürlich mit Kurzschlussanker.

Wir verlangen von ihm mindestens

$$\cos\varphi = 0,8$$

bei normaler Leistung. Wir wollen daher

$$\cos\varphi = 0,85$$

voraussetzen.

Da nun

$$\cos\varphi_m = \frac{f}{f+2} \text{ ist,}$$

so müssen wir $f = 11,4$ erreichen,

$$\text{also } \frac{\sigma^2}{1-\sigma^2} = 11,4$$

das heisst $\sigma = 0,96$.

Diesen Faktor $\sigma = 0,96$ schon bei einpferdigen Drehstrommotoren zu erreichen, gelingt nur mittelst hoher Nutenzahl und sehr sorgfältiger Dimensionierung der Nuten.

Die Ständerwicklung des Motors soll deshalb 48 Nuten erhalten, während die Läuferperipherie 35 Löcher zur Aufnahme der Kurzschlusswicklung bekommt.

Es ist nun für einen dreiphasigen Motor mit Trommelwicklung und Sternschaltung

$$m_a = \frac{V \cdot 30 \cdot 1,05 \cdot 10^8}{Q_l \cdot D_l \sim} \cdot \sqrt{3}$$

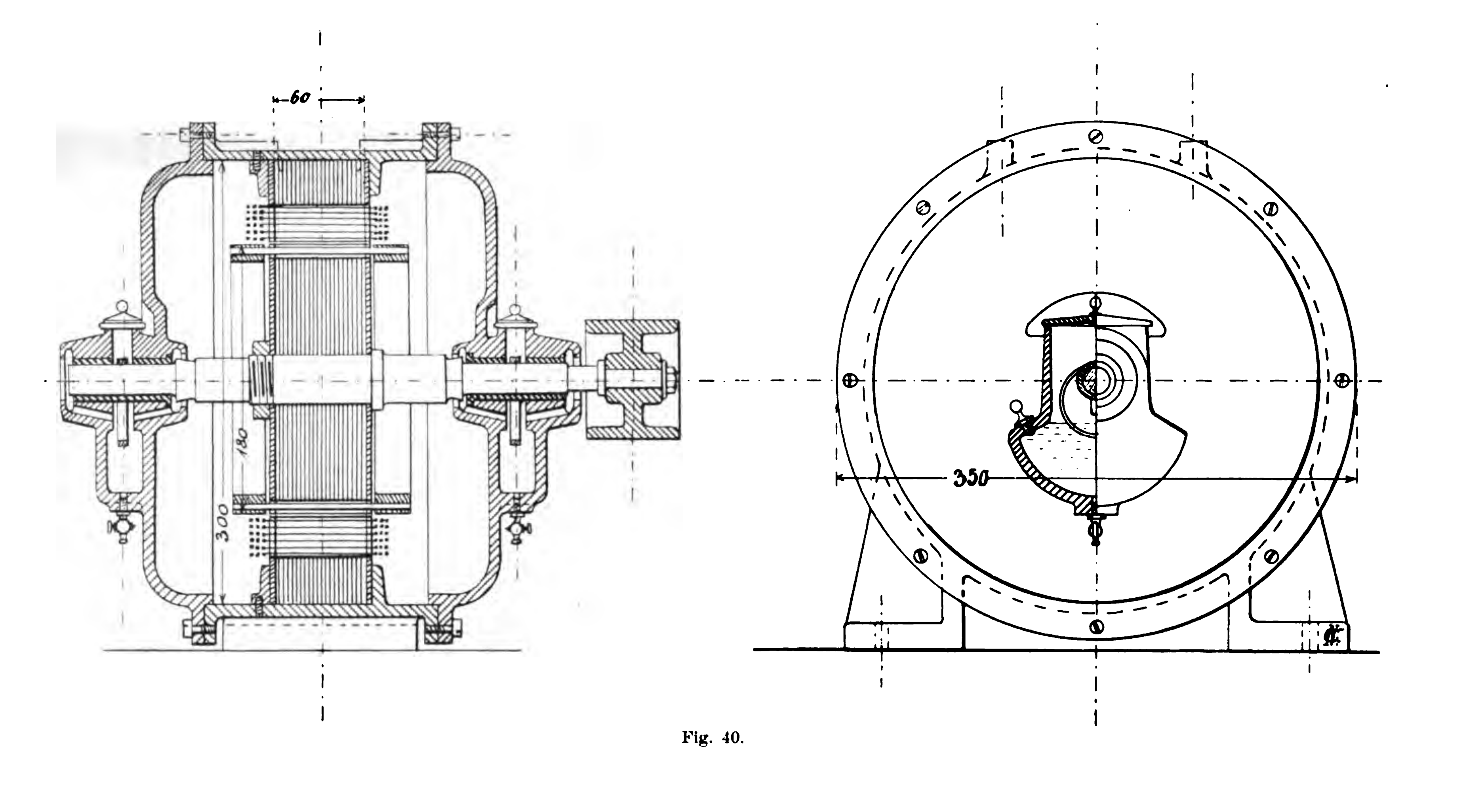



Fig. 40.

Es bedeutet $\frown$ die minutliche Polwechselzahl, $m_a$ die Windungszahl,

$V_a$ die e f f e k t i v e Spannung in Volt,

$Q_l$ den magnetischen Querschnitt eines Poles, was gleichbedeutend ist mit dem Querschnitt eines Luftraumes,

$D_l$ die e f f e k t i v e Kraftliniendichte in letzterem Luftraum.

Ist nun weiter

$P$ die Polzahl des Motors $= \frac{\text{Minutlicher Polwechselzahl}}{\text{Tourenzahl}}$

ferner $a_i$ der Läuferdurchmesser,

$b$ die Läuferlänge;

so ist auszudrücken

$$Q_l = b \cdot \frac{a_i \cdot \pi}{P}.$$

Zuletzt wird

$$m_a = \frac{V \cdot 30 \cdot 1{,}05 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^8 \cdot P}{a_i \cdot \pi \cdot b \cdot D_l \cdot \frown}$$

$$= \frac{V \cdot 30 \cdot 1{,}05 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^8}{a_i \cdot \pi \cdot b \cdot D_l \cdot \text{Touren}}.$$

Man nimmt im allgemeinen für die effektive Kraftliniendichte im Luftraum Werte

von 2000 bis 3000 *cgs*,

also für die m a x i m a l e Kraftliniendichte

von $2000 \cdot \sqrt{2}$ bis $3000 \cdot \sqrt{2}$

also von ca. 2800 bis 4200 *cgs*.

Berechnen wir nun für unseren Motor zunächst die Ständerwicklung.

Es ist

$$V = 110 \text{ Volt effektiv}$$

$$a_i = 18 \text{ cm}$$

$$b = 6 \text{ cm}$$

$$\text{Touren} = 1500$$

und wir nehmen an $D_l = 3000$ *cgs* effektiv.

Dann ist $m_a = \frac{110 \cdot 30 \cdot 1{,}05 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^8}{18 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 3000 \cdot 1500}$

$$m_a = 393,$$

demnach in den 48 Nuten des Ständers $393 \cdot 2$ Drähte unterzubringen, was 17 Drähte per Nute giebt; hierbei wird allerdings

$$m_a = \frac{48 \cdot 17}{2} = 408,$$

für die Stromdichte dieses kleinen Motors nehmen wir vorläufig 3 Amp. per $mm^2$ an; wir werden nachher eine Kontrolrechnung ausführen.

Unter Annahme von $\cos\varphi = 0{,}80$

und Nutzeffekt $\eta = 0{,}75$ wird

bei Sternschaltung die Stromstärke pro Phase

$$J = \frac{736 \cdot 1}{0{,}75 \cdot 0{,}80 \cdot 110 \cdot \sqrt{3}} = 6{,}4 \text{ Amp.}$$

Nehmen wir deshalb zunächst einen Kupferquerschnitt von 2 mm², also

$\Phi = 1{,}6$ mm nackt

1,9 mm isoliert.

Bei dieser für eine kleine Maschine relativ geringen Stromdichte ist zu bedenken, dass der Motor bisweilen das drei- und vierfache seines normalen Stromes auszuhalten hat.

Die einzelne Ständernute erhält demnach zweckmässig nebenstehende Form (Fig. 41), wobei besonders auf die Form des Fusses der Nute hingewiesen sei. Wir möchten nun vor allem feststellen: wie gross ist der Magnetisierungsstrom $i_m$ damit wir für die Überlastungsfähigkeit einen Anhalt haben. Dazu müssen wir die Ampèrewindungen des Motors berechnen.

Fig. 41.

Wir haben im Luftraum den Querschnitt 85 cm²,

im Joch des Ständers 41 cm²,

in den Ständerzähnen im Mittel 40 cm²,

die Erregung des Läufers kann vernachlässigt werden.

Wir haben dagegen eine Weglänge im Luftraum von 0,1 cm,

im Joch des Ständers 24,0 cm,

in den Ständerzähnen 5,4 „

demnach ergeben sich die Kraftliniendichten folgendermassen:

Luftraum = 3000

Joch des Ständers = 6200

Ständerzähne = 6400.

Daraus ergeben sich nun die Ampèrewindungen für ein Polpaar [vierpoliger Motor!]

$$AW_1 = 0{,}8 \cdot 0{,}1 \cdot 3000 = 240$$
$$AW_2 = 24 \cdot 4 = 96$$
$$AW_3 = 5{,}4 \cdot 4 = 22$$

Summa 358.

Die Summe ist mit zwei zu multiplizieren, da wir einen vierpoligen Motor vor uns haben; wir wollen ausserdem noch 10 % für die $AW$ des Läufereisens zuschlagen; es ergiebt sich dann:

$$AW_{total} = 786.$$

Es ist nun

$$i_m = \frac{786 \cdot \sqrt{3}}{m_o \cdot \sqrt{2}} = 2{,}35 \text{ Ampère.}$$

Wir können aus diesem Resultat sofort entnehmen, dass, da wir

$$f = 11{,}4$$

angenommen hatten, der maximale Wattstrom, der Radius des HEYLANDschen Diagrammes, gleich sein würde

$$0{,}5 \cdot i_m \cdot f = \text{rd } 13\tfrac{1}{2} \text{ Ampère.}$$

Nehmen wir bei der starken Überlastung nur 65 % Nutzeffekt an, so würde dieser Wattstrom von 13,5 Ampère einer Leistung von $2\frac{1}{4}$ PS eff. entsprechen.

Der vorstehend in seiner Ständerwicklung berechnete Motor würde allen Bedingungen entsprechen, die man einen guten Drehstrommotor stellen kann; wenn man aber auf Grund der obigen Daten das Diagramm aufzeichnen würde, fände man bei normaler Belastung

$$\cos\varphi = 0{,}83$$

während wir nur gefordert hatten 0,80.

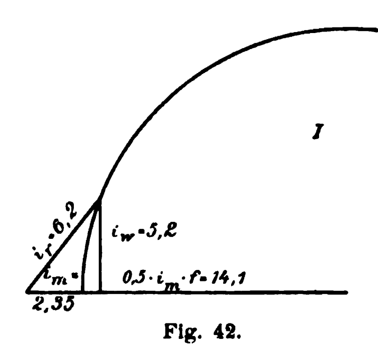


Fig. 42.

Es ist nun aber sehr wohl möglich, dass bei sauberer Fabrikation und geeigneter Nutenanordnung der Wert

$$f = 11{,}4$$

$$\text{bezw. } \cos\varphi_{max} = 0{,}85$$

ganz wesentlich überschritten wird.

In den Figg. 42 und 43 sind zwei Diagramme des Motors gegeben; das erste ist giltig für

$$f = 12$$

$$i_m = 2{,}35$$

$$\text{Radius} = 0{,}5 \cdot 2{,}35 \cdot 12 = 14{,}1$$

$$\cos\varphi_{max} = \frac{12}{14} = 0{,}86.$$

Das zweite ist konstruiert unter der Annahme von

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0{,}98$$

$$f = 24$$

$$i_m = 2{,}35$$

$$\text{Radius} = 28{,}2$$

$$\cos\varphi_{max} = 0{,}92,$$

der Wattstrom für eine Leistung von 1 PS bei 75 % Nutzeffekt beträgt pro Phase

$$J_w = \frac{736 \cdot 1}{0{,}75 \cdot 110 \cdot \sqrt{3}} = 5{,}2 \text{ Ampère.}$$

Diese Zahl ist als Ordinate in beide Diagramme eingetragen; es ergiebt sich dann im ersten Diagramm

$$\cos\varphi = \frac{5,2}{6,2} = 0,84$$

und im zweiten Diagramm

$$\cos\varphi = \frac{5,2}{6,0} = 0,87$$

als Kosinuswert oder „Leistungsfaktor“ für e i n e Pferdekraft. Man kann natürlich nicht vorhersagen, welchen Wert der Faktor $\sigma$ und daher $f$ bezw. $\cos\varphi$ annehmen wird; die Fabrikation hat hier viel in ihrer Hand, schablonenmässig darf gerade hier nicht gearbeitet werden.

Von dem berechneten Motor wird man aber mit Rücksicht auf seine Ergebnisse in der Praxis, für welche Versuche im Laboratorium des Verfassers an etwa 80 derartigen Motoren von 1 PS vorliegen, sagen können, dass die Werte der Leistungsfaktoren bezw. der Streuungsfaktoren zwischen den Grenzwerten der obigen Diagramme schwanken.

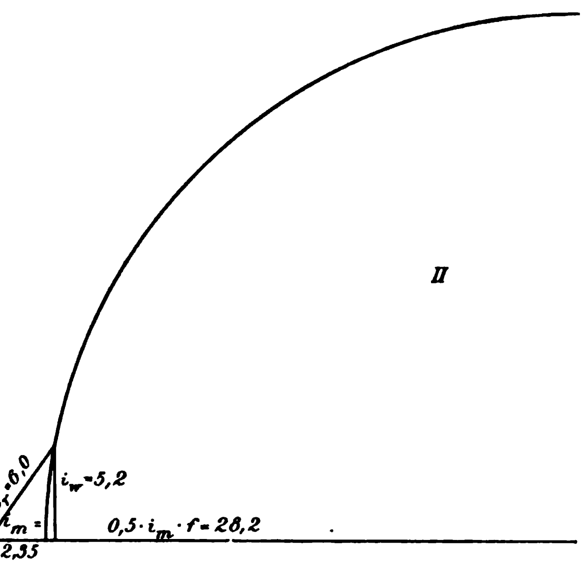


Fig. 43.

Es bleibt uns zunächst noch übrig, die Erwärmung des Ständers zu kontrollieren, zu diesem Zwecke, da ja der Ständer sich nicht bewegt, bedienen wir uns der Formel von FISCHER-HINNEN, welche wir für die Spulenerwärmung bei Gleichstrom anwandten.

$$T = \frac{335 \cdot \text{Wattverluste}}{\text{Oberfläche}}$$

1) Elektrischer Verlust.

$$\text{Windungszahl pro Phase } \frac{408}{3} = 136$$

$$\psi\ 1,6 \text{ mm } q = 2,0 \text{ mm}^2.$$

Mittlere Länge einer Windung = 0,62 m! [Reichlich rechnen!],

$$\text{Widerstand einer Phase } w_{ph} = \frac{0,018 \cdot 0,62 \cdot 136}{2.0} = 0,76\ \Omega,$$

Stromstärke normal 6,2 Ampère,

$$\text{Verlust pro Phase } 6,2^2 \cdot 0,76 = 29 \text{ Watt},$$

$$\text{Verlust in allen drei Phasen} = 87 \text{ Watt}.$$

2) Hysteresisverluste in Joch und Zähnen.

Wir können dieselben nämlich in diesem Falle kombinieren, da im Joch und in den Zähnen fast die gleiche Dichte herrscht.

$$\text{Kubikinhalt des Ständers} = 2600\ cm^3,$$

$$\text{Dichte der Kraftlinien} = 9000\ cgs,$$

$$\omega = 50 \sim.$$

$$\text{Hysteresisverlust} = 0{,}003 \cdot 9000^{1{,}6} \cdot 50 \cdot 2600 \cdot 10^{-7} = 83\ \text{Watt}.$$

Die Wirbelströme vernachlässigen wir.

Gesamtsumme der Verluste 170 Watt,

Oberfläche des Ständers 1810 $cm^2$,

$$\text{Temperaturerhöhung } T = \frac{335 \cdot 170}{1810} = 31{,}5^0\ \text{C}.$$

Wenden wir uns nun zur Berechnung des Läufers. Hätten wir einen gewickelten Läufer, so müsste der in allen seinen Nuten zusammenliegende Kupferquerschnitt sich zu dem in allen Ständernuten zusammenliegenden Kupferquerschnitt verhalten wie der Leistungsfaktor zur Zahl 1.

Diesen Satz beim Kurzschlussläufer zu Grunde zu legen, hindert zweierlei: erstens haben die Kurzschlussringe keinen nennenswerten Widerstand und zweitens soll ein Kurzschlussläufer im Interesse seiner Anzugskraft nicht zu geringen Läuferwiderstand erhalten.

Es ist daher üblich, bei Kurzschlussläufern nur 50 bis höchstens 75 $^0/_0$ des Gesamtkupfers der Ständernuten in den Läuferlöchern anzuwenden; es giebt sogar Beispiele, wo durch Anwendung schlechter leitenden Metalles (Messing) ein höherer Widerstand absichtlich erreicht ist (A. E.-G., Memeldelta-Anlage).

In unserem Falle ist das Gesamtkupfer der Ständernuten von folgendem Querschnitt:

$$48 \text{ Nuten} \times 17 \text{ Drähte} \times 2\ mm^2 = 1632\ mm^2.$$

Nehmen wir davon 75 $^0/_0$ als Gesamtquerschnitt der Läuferdrähte, so ist in jedem der 35 Läuferlöcher ein Kupferquerschnitt von

$$\frac{1632 \cdot 0{,}75}{35} = 35\ mm^2$$

unterzubringen. Dies entspricht einem Kupferdraht vom

$$\Phi = 6{,}5 \text{ mm ungefähr}.$$

Wir werden daher den Läufer mit 35 Löchern von 9 mm $\Phi$ versehen zur Aufnahme dieser Drähte.

Kontrolle: Die zwischen den Löchern befindlichen Eisenzähne haben ihre engste Stelle in ihrer Mitte; es fragt sich, ob sie an dieser Stelle mechanisch und magnetisch stark genug sind. Die Nachrechnung ergiebt 5,5 mm Stärke, sowohl mechanisch als magnetisch (ca. 9000 $cgs$) völlig ausreichend.

## II. Drehstrommotor D. M. 30

der Firma Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. HERM. PÖGE, Chemnitz

(Fig. 44).

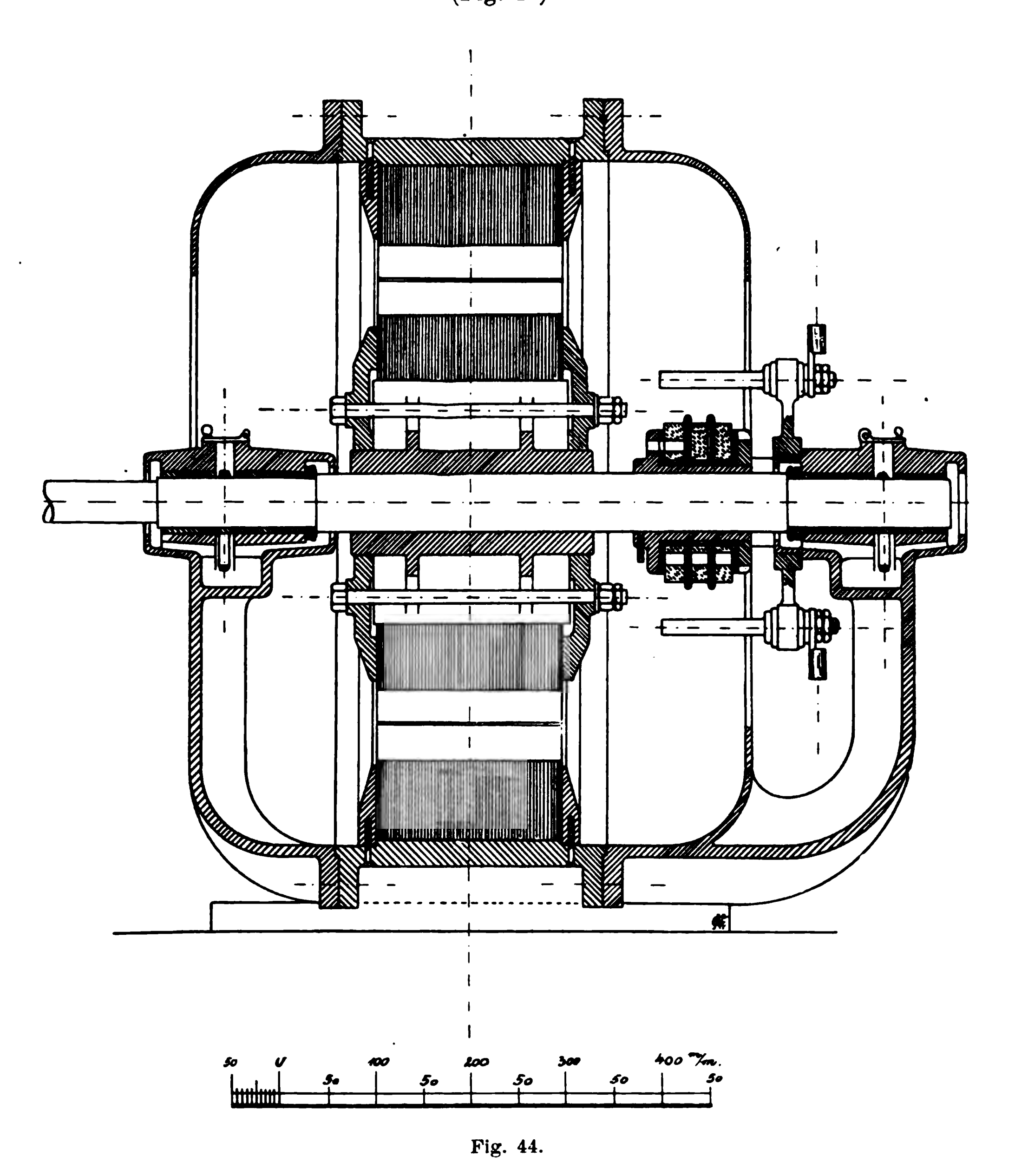


Fig. 44.

Zu der aus der Zeichnung ersichtlichen Konstruktion giebt die Firma noch folgende weitere Daten:

a) Feld (Ständer).

| | |
|---|---|
| Leistung | 30 HP |
| Verkettete Spannung | 210 Volt |
| Tourenzahl | 800 |
| Periodenzahl | 40 |
| Anzahl der Nuten am Umfang | 108 |
| Dimension | Breite 8 mm, Tiefe 25 mm |
| Drahtstärke | $\Phi$ 4,7 mm, isoliert $\Phi$ 5,4 mm. |

Anzahl der Drähte pro Loch 4, von denen je 2 parallel geschalten sind. Die Wicklung ist zu einer Sternschaltung verbunden.

b) Anker (Läufer).

| | |
|---|---|
| Lochzahl am Umfang | 72 |
| Dimension | Breite 12 mm, Tiefe 30 mm |
| Drahtstärke | $\Phi$ 3,8 mm, isoliert 4,5 mm. |

Pro Loch 10 Drähte, von denen je 2 parallel geschalten sind. Die Wicklung ist zu einer Sternschaltung verbunden.

Nachstehend giebt die Firma auch die durch Bremsversuch an diesem Motor festgestellten Resultate (Fig. 44a).

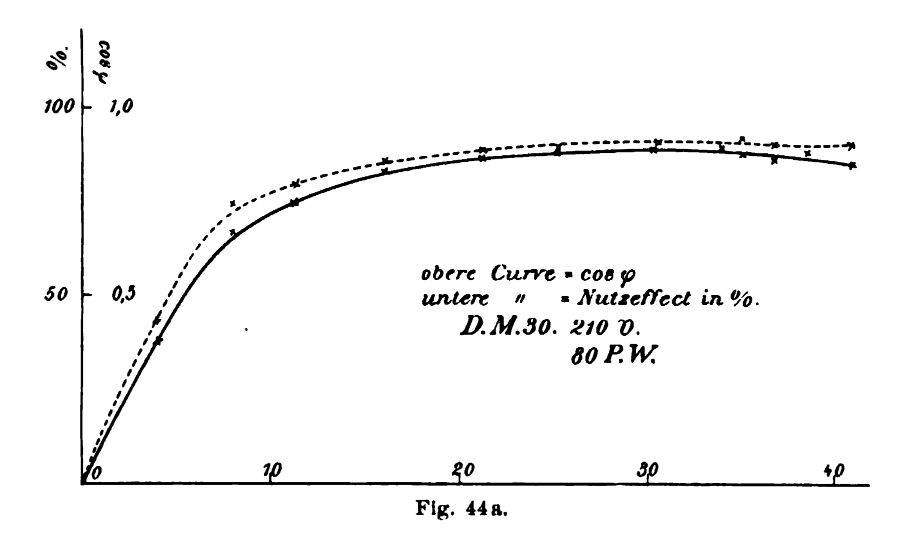



Fig. 44a.

## Prüfung von Drehstrommotoren.

Die Prüfung eines dreiphasigen Wechselstrommotors hat im Laboratorium einer Maschinenfabrik folgendermassen zu geschehen:

Nachdem der Elektromotor in den Probierraum gebracht ist, wird zunächst die Isolation seiner Bewicklungen gegen Eisen gemessen. Hierbei

wird von der Ständerwicklung selbstverständlich unter normalen Verhältnissen eine höhere Isolation zu verlangen sein, als von der Bewicklung des Läufers, da die letztere wohl immer eine niedrigere Spannung beim Anlaufen und während des Betriebes gar keine Spannung wegen des kurz geschlossenen Anlasswiderstandes oder überhaupt wegen der Ausführung als Kurzschlussläufer haben wird. Die Stäbe eines Kurzschlussankers brauchen überhaupt nicht gegen das Läufereisen isoliert zu sein; wenn man sie dennoch, ehe sie in die zu ihrer Aufnahme bestimmten Löcher des Läufers eingesteckt werden, mit einer leichten Isolationshülle versieht, so geschieht dies meistens aus einem anderen Grunde, nämlich um mechanischen Verletzungen vorzubeugen.

Es ist ferner die Isolation der drei Phasen des Ständers gegeneinander zu messen, da es ja unter Umständen vorkommen kann, dass hier von vornherein seitens der Werkstatt ein Versehen vorliegt. Zu diesem Zwecke ist es immer empfehlenswert, jede einzelne Phasenwicklung mit ihrem Anfang und ihrem Ende an je einer besonderen Klemme auf dem Klemmbrett des Motors zu legen, sodass ein dreiphasiger Induktionsmotor für seine Ständerbewicklung jedenfalls sechs Klemmen haben soll. Abgesehen von der Isolationsprüfung bedingt auch bei kleineren Motoren schon die oft gewünschte Möglichkeit des Einschaltens eines Dämpfungswiderstandes in den Kurzschlusspunkt diese Schaltung.

Nach dieser Isolationsprüfung sind die Widerstände der einzelnen Ständerphasen sowie die Widerstände — wenn es sich um einen bewickelten Läufer handelt — zwischen je zwei Schleifringen ebenfalls zu messen. Diese Widerstände sollen nach Möglichkeit gleich gross ausfallen, was durch eine entsprechend ausgeführte Bewicklung leicht zu erzielen ist.

Es folgt hieraus die Ermittelung des Magnetisierungsstromes des Motors. Der Motor wird mit seiner Ständerbewicklung an eine Stromquelle von vorgeschriebener Spannung und richtiger Polwechselzahl angelegt; hat der Läufer Kurzschlussschaltung, so fällt die Ermittelung des Magnetisierungsstroms zusammen mit der Messung des Leerlaufstroms. Wie wir wissen, besteht ein praktischer Unterschied zwischen beiden nicht. Besitzt der Läufer eine Wicklung mit Schleifringen, so wird natürlich zunächst der reine Magnetisierungsstrom gemessen, also derjenige Strom, welcher im Ständer entsteht, wenn die Bürsten abgehoben oder der Widerstand des Läufers ausgeschaltet ist. Erst dann wird der Motor angelassen, um seinen Leerlaufstrom zu ermitteln. Man wird indessen immer finden, dass mit den in Laboratorien von Maschinenfabriken gebräuchlichen Strommessern eine Differenz zwischen Magnetisierungsstrom und Leerlaufstrom nicht zu konstatieren ist.

Bei dieser Ermittelung des Leerlaufstroms gewinnt man zu gleicher Zeit ein ungefähres Bild über die Anlaufskraft des Motors sowie über die Stromstärke, welche der Motor in seiner Ausführung mit Kurzschlussläufer zum Anlauf benötigt. Jedenfalls sollen dreiphasige Induktionsmotore, wenn man sie leer anlaufen lässt, nicht länger als zwei bis vier Sekunden zu ihrem Anlauf benötigen.

Hierauf folgt die Aufnahme der Kurzschlusskurve. — Der Läufer des Motors wird wie beschrieben fest gebremst, so dass er sich nicht drehen kann, und nun werden unter langsamer Steigerung der Spannung bei richtiger Polwechselzahl die entsprechenden Stromstärken mittels eines genau

zeigenden Stromzeigers ermittelt und zwar nach Möglichkeit bis zu $^2/_3$ der normalen Spannung. Es genügt indessen, wie weiter oben schon auseinandergesetzt, wenn man die Spannung bis zur Hälfte der normalen in die Höhe treibt. Die ermittelten zusammengehörigen Stromstärken und Spannungen werden als Ordinaten und Abcissen in ein Koordinatennetz eingetragen und ergeben wie bekannt eine gerade Linie, die Kurzschlusskurve. Diese Kurve wird soweit verlängert, dass die sich bei voller Spannung ergebende Stromstärke ablesbar ist.

Bei Motoren, deren Läufer eine Phasenwicklung mit Schleifringen trägt, kann auch die etwas kompliziertere oben beschriebene Ermittelung der Streuungskoeffizienten erfolgen, doch ist für alle Fälle der Praxis, wenn eine genügend grosse Stromquelle zur Verfügung steht, die Aufnahme der Kurzschlusskurve als sicherer vorzuziehen; wer einmal versucht hat, an einem Drehstrommotor mit Schleifringläufer die Streuungsmessungen bezw. die Ermittelung der Streuungskoeffizienten $\sigma_1$ und $\sigma_2$ vorzunehmen, wird wissen, wie mühsam und wie unsicher diese Arbeit ist. Die Messung grösserer Stromstärken und Spannungen ist dagegen meistens einwandsfrei.

Aus der Kurzschlusskurve oder der Streuungsmessung ist nun ohne weiteres, da ja der Magnetisierungsstrom bereits bekannt ist, das Diagramm von Heyland zu zeichnen.

Es sollte den Firmen zur Pflicht gemacht werden, keinen Drehstrommotor aus dem Prüfraume zu lassen, dessen Diagramm nicht gezeichnet ist. In welcher Weise das Heylandsche Diagramm uns aufklärt über die Betriebsverhältnisse eines Drehstrommotors, ist weiter oben bereits gesagt. Es wird bei der Laboratoriumsprüfung vor allen Dingen auf die Ermittelung des $\cos \varphi$ bei halber, normaler und etwa 50 % Überlastung, sowie auf die Überlastungsfähigkeit des Motors, welche identisch ist mit seiner Anzugskraft, ankommen.

Wenn man nun auch diese Messungen gemacht hat, so pflegt man doch gewöhnlich weniger zur Kontrolle des Heylandschen Diagramms bezw. der Richtigkeit der eigenen Messungen, als vielmehr, um auch über den Nutzeffekt des Motors gebührend unterrichtet zu sein, kleinere Motore wenigstens zu bremsen. Es geschieht dies am einfachsten bekanntlich mittelst einer Federwage, deren Zug an einem schmalen Lederband ausgeübt wird, welch letzteres einmal um die Peripherie einer eisernen, an beiden Seiten mit kleinen Flanschen versehenen Bremsscheibe herumgelegt ist. Diese Anordnung erfordert keine Wasserkühlung und die Bremsversuche an einem Motor sind in exakter Weise während weniger Minuten ausführbar. Dass man natürlich während des Bremsens auch ein Wattmeter in eine der drei Phasen einschaltet, bedarf wohl keiner besonderen Erwähnung, da es sich bei der Ausrechnung des Wirkungsgrades des Motors um den wirklichen Arbeitsstrom und nicht um den resultierenden Strom handelt.

Die Bremsversuche ergeben auch ein Bild über die Tourenschwankung des Motors bei seinen verschiedenen Belastungsstadien. Eine allgemeine Anforderung gleicher Art bezüglich der Tourenschwankung lässt sich nicht gut stellen. Man muss hierbei immer den Verwendungszweck des Motors im Auge haben. Es ist einerseits sehr wohl denkbar, dass von einem Motor selbst kleinerer Leistung eine möglichst konstante Tourenzahl bei Belastungsschwankungen verlangt wird, und es ist dies auch natürlich sehr wohl ausführbar. Ebensowohl kann aber verlangt werden, dass ein Motor mit Kurz-

schlussläufer eine sehr hohe Anzugskraft besitzen soll, und es stehen gerade die beiden Forderungen eines geringen Tourenabfalls und einer hohen Anzugskraft bei Kurzschlussläufermotoren in direktem Gegensatz zueinander. Für gewöhnlich wird man nach Möglichkeit beide Forderungen zu verschmelzen suchen, und giebt daher kleineren Motoren von 1 bis 3 PS etwa 5 % Tourenabfall; grössere Motore werden ja sowieso mit Schleifringläufer ausgeführt. Bei dieser Ausführungsform ist es natürlich leicht, den Tourenabfall sehr klein zu machen, weil man ja in dem Anlasswiderstande bereits die Möglichkeit besitzt, die Anzugskraft stark zu machen.

Der Tourenabfall eines Drehstrommotors ist lediglich abhängig von dem Verluste in der Läuferbewicklung. Je grösser daher der Widerstand der Läuferbewicklung ist, desto grösser wird unter sonst gleichen Verhältnissen auch der Tourenabfall sein. Hinzu kommt natürlich noch, dass auch durch andere Verhältnisse der elektrische Verlust in der Läuferbewicklung grösser sein kann, so z. B. durch eine schlechte Dimensionierung der Streuungsfaktoren, also im allgemeinen gesagt, durch eine zu grosse Phasenverschiebung, durch eine zu grosse wattlose Komponente. Diese Komponente überträgt sich natürlich auch auf die Läuferbewicklung, und die Folge hiervon ist, dass auch die Stromstärke des Läufers stark verschoben ist gegen die erzeugende Spannung. Es geht dies übrigens auch direkt aus dem HEYLANDschen Diagramm hervor.

Nachdem diese Messungen beendigt sind und das gewünschte der Berechnung zu Grunde gelegte Resultat ergeben haben, folgt die übliche Dauerprobe von 4 bis 6 Stunden für den Elektromotor. Über diese Dauerprobe selbst dürfte, nachdem wir uns bei Gelegenheit der Besprechung der Gleichstrommotoren eingehend darüber verbreitet haben, kaum noch etwas hinzuzufügen sein. Nach Beendigung der Dauerprobe folgt die übliche Messung der Temperatur und der Isolationswiderstände in warmem Zustand.

Was können nun für Fehler bei Drehstrommotoren auftreten und wie zeigen sich diese im Prüfraume oder in der Praxis?

Zunächst ist es denkbar, dass seitens der Werkstatt eine falsche Schaltung der Ständerbewicklung vorgenommen worden ist und zwar derart, dass bei einer der drei Phasen der Anfang und das Ende der Bewicklung vertauscht worden sind. Der Bewicklung des Motors ist das in den seltensten Fällen direkt anzusehen, da bekanntlich Drehstrommotore mit Vorliebe mit einem vollständig oder nahezu ganz geschlossenen Gehäuse ausgeführt werden. Indessen ist es sofort merkbar bei Gelegenheit der Messung des Magnetisierungsstroms. Es zeigt dann eben eine Leitung mehr Strom, als die zweite und dritte; der Motor ist mit anderen Worten in seiner Ständerbewicklung mit 60° Phasendifferenz geschaltet, während ihm Drehstrom von 120° Phasendifferenz zugeführt wird. Es sollte daher bei der Ermittelung des Magnetisierungsstroms letzterer, wenn irgend möglich, für alle drei Leistungen bestimmt werden, wenigstens aber für zwei derselben, was sich wohl jederzeit ermöglichen lässt.

Derselbe Fehler findet sich hin und wieder bei der Läuferbewicklung von Drehstrommotoren mit Schleifringläufer. Auch hier zeigt sich sofort eine Komplikation im Magnetisierungsstrom des Ständers. Ausserdem verhält sich der Motor nicht geräuschlos, sondern brummt heftig und läuft nicht an. Die Ermittelung des Fehlers ist leicht, indem man mittelst eines Voltmeters bei abgehobenen Bürsten die Spannung zwischen den drei Schleif-

ringen misst. Man wird dann sofort ungleichmässige Spannungen finden und kann mit Sicherheit auf die falsche Schaltung von 60° Phasendifferenz schliessen. Ausser diesen Schaltungsfehlern kann natürlich auch ein komplizierter Isolationsfehler vorliegen, der indessen ja schon von vornherein durch die Isolationsmessung gemerkt werden muss, wenn er sich nicht etwa in der Bewicklung einer Phase allein vorfindet. Es ist nicht ausgeschlossen, dass einzelne Windungen einer und derselben Phase untereinander Schluss haben, was man natürlich nicht durch eine Isolationsmessung und auch nicht immer durch eine Widerstandsmessung herauszufinden in der Lage ist. Indessen ist in diesem Falle dann auch wieder der Magnetisierungsstrom das Kriterium; es wird natürlich für eine derartige Phasenwicklung, bei welcher also einige Windungen ausgeschaltet sind, der Leerlaufstrom grösser ausfallen, als für die intakten Phasen.

Ein Fehler, welcher auch bisweilen sich bemerkbar macht, besteht darin, dass der Motor keine genügende Anzugskraft besitzt bezw. im Heylnadschen Diagramm einen zu kleinen Radius zeigt. Es ist leicht möglich, dann der Sache auf den Grund zu gehen; es können hierfür ja nur zwei Gründe massgebend sein, einmal etwa ein zu geringer Magnetisierungsstrom und das anderemal schlechte Streuungskoeffizienten. Den Fall von Konstruktionsfehlern wollen wir nicht ins Auge fassen; es handelt sich für uns lediglich um Werkstattsfehler. Sind wir zu dem Schlusse gelangt, dass der Leerlaufstrom zu gering ist, so ist ohne jede Frage der Luftraum des Motors zu gering ausgefallen, da wir ja annehmen müssen, dass die Berechnung des Motors richtig ist. Der Fehler wird also leicht beseitigt dadurch, dass der Ständer oder der Läufer eine entsprechende Nachbearbeitung erfährt. Liegt der andere Fall vor, dass zwar der Leerlaufstrom gross genug, indessen die Streuung zu hoch ist, so wird man sich auch noch in den meisten Fällen durch Aufschlitzen der Nuten helfen können.

Wir gehen nun dazu über, die einphasigen Wechselstrommotore zu behandeln.

Wie oben auseinandergesetzt, entsprang die Entdeckung des mehrphasigen Stromsystems bezw. des Drehstrommotors eigentlich dem Bedürfnis, einen guten Wechselstrommotor zu finden. Nachdem einige Jahre auf die Vervollkommnung und das Studium der Drehstrommotore verwandt worden war, gelang es zunächst Brown, dem damaligen Chefingenieur der Maschinenfabrik „Oerlikon“, aus dem Drehstrommotor den einphasigen Induktionsmotor zu entwickeln.

## Einphasige Motoren.

Der einphasige Wechselstrommotor ist gebaut genau nach denselben Prinzipien, wie der mehrphasige Induktionsmotor. Da er indessen mit Wechselstrom von nur einer Phase betrieben werden soll, so hat er im Normalbetriebe nur eine Wicklung auf seinem Ständer. Derartige Motore verhalten sich ähnlich wie Drehstrommotore bezüglich der Überlastungsfähigkeit, des Tourenabfalls, der Phasenverschiebung u. s. w., laufen indessen nicht von selber an. Der Anlauf wird nur ermöglicht dadurch, dass der Motor zum Zwecke des Anlaufs eine besondere zweite Wicklung, die sogenannte Hilfswicklung, auf dem Ständer trägt. Diese Wicklung hat räumlich zu der Hauptwicklung eine solche Lage, dass sie um 90° verschoben

ist. Der Einphasenmotor mit Hilfswicklung ist daher während der Zeit seines Anlaufens ein Zweiphasenmotor. Er würde vorzüglich und in jeder Weise wie ein korrekter Zweiphasenmotor anlaufen, wenn die beiden Ströme, der Hauptstrom und der Hilfsstrom, wirklich eine Verschiebung von $90^0$ gegeneinander besitzen würden. Es ist indessen unmöglich, dies zu erzielen. Beide Wicklungen werden von demselben Strome gespeist. In einer von den beiden Wicklungen wird nun gegen die andere eine künstliche Phasenverschiebung hergestellt und zwar nach verschiedenen Methoden, die wir gleich erwähnen wollen. Indessen ist es durch alle diese Methoden nicht denkbar, die Ströme der beiden Wicklungen korrekt um $90^0$ gegeneinander zu verschieben, und deshalb ist es auch nicht möglich, den Motor mit einer nennenswerten Anzugskraft anlaufen zu lassen.

Es gelingt in neuerer Zeit, vor allem seitdem man auch für einphasige Wechselstrommotore die Vorzüge der Schleifringanker erkannt hat, den Motoren wenigstens soviel Anzugskraft zu geben, dass sie mit einer Leerscheibe oder allenfalls mit einer leerlaufenden Transmission in Betrieb gebracht werden können.

Man kennt in praktischer Hinsicht drei Methoden, um in der Hilfswicklung gegen die Hauptwicklung eine Phasenverschiebung zu erzielen. Zunächst muss man sich dabei klar machen, dass beim Anlaufen des Motors von vornherein eine grosse Phasenverschiebung und zwar eine Phasennacheilung in beiden Wicklungen vorhanden sein muss. Wir besitzen nun Mittel, um eine solche Phasennacheilung zu verstärken, und auch Mittel, um eine solche zu vermindern. Eine Phasennacheilung wird verstärkt durch eine Selbstinduktionsspule, vermindert wird sie durch einen Kontensator.

Daher sind die beiden hauptsächlichen Mittel, auf welche wir in der Praxis der einphasigen Induktionsmotore angewiesen sind, die Selbstinduktionsspule und der Kondensator. Man kann nicht entscheiden, welche von beiden Methoden besonders in Benutzung ist.

Von vornherein dürfte klar sein, dass die Kombination beider Mothoden jedenfalls wohl das beste Resultat geben würden, wenn man sich nicht allerdings vor dem erhöhten Preise einer solchen doppelten Anordnung scheuen müsste. Es ist praktisch sehr wohl möglich, durch geeignete Bemessung der Wicklungen und durch Anwendung eines Kondensators in der einen, einer selbst induzierenden Spule in der anderen Wicklung, wenigstens praktisch eine Phasenverschiebung von $90^0$ herzustellen. Aber man begegnet dieser Anordnung in der Praxis niemals, vielmehr begnügen sich alle Firmen, entweder die eine oder die andere Methode anzuwenden.

Es ist leicht zu entscheiden, welche von beiden Methoden am sichersten zum Ziele führt. Von vornherein existiert in den beiden Bewicklungen, welche wir für diesen Fall der theoretischen Betrachtung als gleichliegend und mit gleicher Windungszahl versehen annehmen wollen, eine Phasennacheilung. Schalten wir nun in einer der beiden Wicklungen eine Selbstinduktionsspule ein, so wird in dieser Wicklung der Magnetisierungsstrom, d. h. der wattlose Strom, noch grösser und natürlich infolge der Zusammensetzung mit dem Arbeitsstrom die Phasennacheilung noch grösser werden. Indessen ist es erstens nicht gut möglich, mehr als $90^0$ Phasennacheilung hinter der erzeugenden Spannung zu erzielen, und zweitens besteht bereits in der anderen Wicklung beim Anlaufen eine ganz beträchtliche Phasennach-

eilung, sodass das Resultat dieser Schaltung schliesslich einen gegenseitigen Unterschied in der Phase um einige wenige Grade bedeutet.

Der Kondensator hat aber die Eigenschaft, die Phasen vorwärts zu drehen, und zwar ist dies in weiteren Grenzen möglich. Es ist daher unbedingt der Kondensator vorzuziehen. Hierfür spricht auch noch der Grund, dass dann der aus den beiden Magnetisierungsströmen der beiden Phasenwicklungen sich zusammensetzende Magnetisierungsstrom erheblich kleiner wird.

Der Kondensator wird in der Praxis angewendet als Flüssigkeitskapazität oder als trockene Seifenkapazität. Erstere besteht aus einer Anzahl hintereinander geschalteter dünner Eisenbleche, welche sich gegenseitig nicht berühren und in einer Sodalösung stehen. Der Strom durchläuft die Flüssigkeitskapazität in der Weise, dass er von Eisenplatte zu Eisenplatte durch die Flüssigkeit hindurchzugehen gezwungen ist.

Diese Flüssigkeitskapazitäten haben einige unangenehme Eigenschaften, welche ebenfalls den Betrieb mit einphasigen Wechselsstrommotoren nicht so betriebssicher gestalten, wie man dies wünschen möchte. Im Sommer verdunstet leicht die Flüssigkeit und im Winter friert sie unter Umständen leicht ein, vor allen Dingen neigt die Sodalösung zur Krystallisation. Ist aber einmal dieser Zustand annähernd eingetreten, dann geht überhaupt kein Strom mehr durch die Kapazität und daher auch nicht durch die mit ihr in Hintereinanderschaltung befindliche Wicklung, zum mindesten tritt die beabsichtigte Phasenverschiebung nicht ein.

Daher werden in neuerer Zeit vielfach sogenannte trockene Kapazitäten in Anwendung gebracht, welche in folgender Weise zusammengesetzt sind:

Es wird ein Quantum gewöhnliche grüne Schmierseife gekocht und mit dieser Substanz die Eisenbleche verschmiert. Zwischen je zwei Eisenblechen werden ausserdem dünne Gazestreifen von derselben Form, wie die Eisenbleche gelegt, nachdem diese Gazestreifen zuvor in die Seifensubstanz getaucht worden sind. Indessen haben auch die Seifenkapazitäten ihre Schattenseiten. Sie sind einmal zu feucht und das anderemal zu trocken und geben ebenfalls leicht Veranlassung zu Anständen.

Die Schaltung der beiden Wicklungen eines Einphasenmotors unter zu Grunde Legung von Selbstinduktion oder Kapazität ist in Fig. 45 dargestellt.

Die beiden ersten Figuren zeigen die schematische Darstellung der Schaltung, wie letztere früher üblich war. Es lag dabei die Hauptspule parallel zur Hilfsspule. Es ist ohne weiteres klar, dass eine solche Kombination einen ziemlich hohen Anlaufstrom zur Folge hat, wenn auch die beiden in den verschiedenen Wicklungen kursierenden Ströme sich geometrisch und nicht arithmetisch addieren. Man ging deshalb in neuerer Zeit dazu über, die beiden verschiedenen Wicklungen hintereinander zu schalten, wodurch dann die beiden weiteren Figuren entstehen.

Naturgemäss läuft der Motor bei der ersteren Schaltung besser an, da jede seiner beiden Spulen dann unter der vollen Netzspannung beim Einschalten steht; dies ist ein Grund, weswegen die erstere Schaltung, trotzdem sie veraltet erscheint, in allen den Fällen vorzuziehen ist, wo es durch andere Hilfsmittel gelingt, den allzu hohen Anlaufstrom herunter zu drücken; und dies ist bei Einphasenmotoren mit gewickeltem Anker und Schleifringen, zwischen welchen wie bei Drehstrommotoren ein Anlasswiderstand geschaltet wird, der Fall.

Die Vorzüge der Schleifringanker sind ausführlich besprochen worden, als wir die Drehstrommotoren betrachteten. Wie bei den Drehstrommotoren, so liegt auch bei den einphasigen Wechselstrommotoren der Hauptvorteil des Schleifringankers darin, dass er die Verwendung eines Anlasswiderstandes möglich macht, ohne das magnetische Feld zu schwächen, indem dieser Anlasswiderstand nicht vor die Ständerbewicklung, sondern in die Läuferbewicklung eingeschaltet wird.

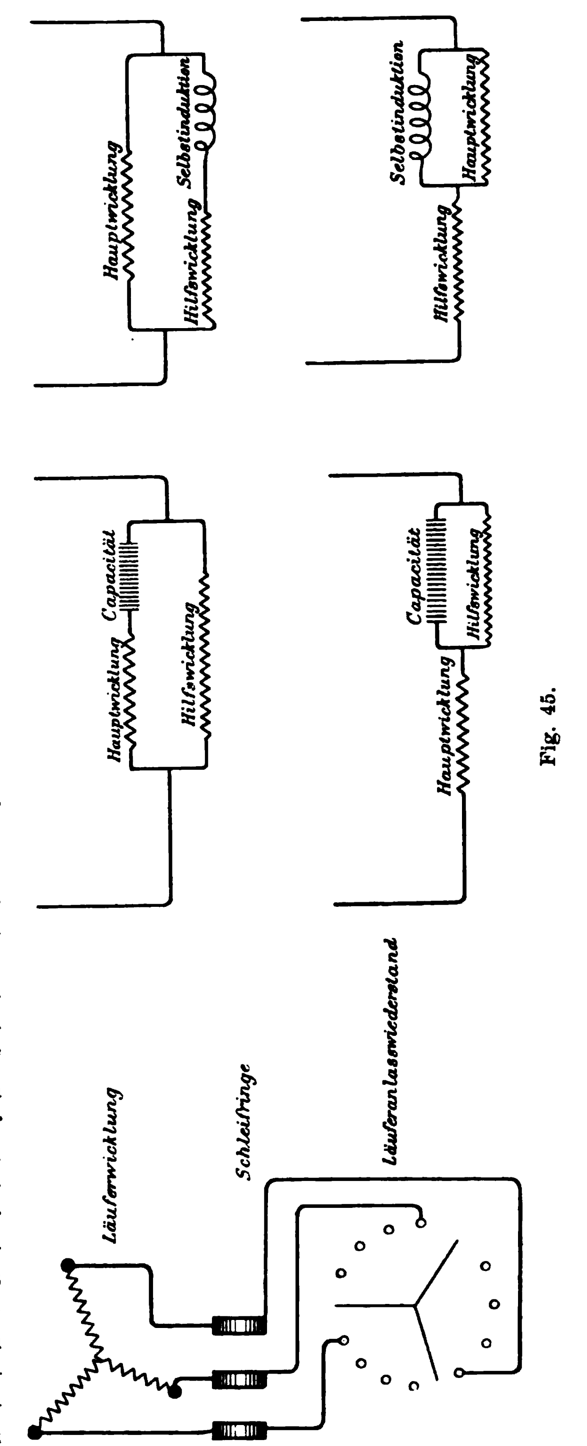


Fig. 45.

Wir haben daher wohl nicht nötig, uns noch besonders über die Läuferkonstruktionen bei einphasigen Wechselstrommotoren zu verbreiten; nur das eine sei nochmals hervorgehoben, dass alle Firmen die Läufer ihrer Einphasenmotoren gewöhnlich mit dreiphasiger Wicklung von 120° Phasendifferenz und mit drei Schleifringen in Sternschaltung ausführen.

Die Betriebsverhältnisse der einphasigen Wechselstrommotoren sind, wie schon weiter oben erwähnt, cum grano salis genau dieselben, wie die Betriebsverhältnisse der dreiphasigen Wechselstrommotoren. Es entsteht beim einphasigen Wechselstrommotor, wenn er auf seine Tourenzahl hinaufgelaufen ist und infolgedessen der Läufer sich fast synchron mit dem Wechselstromfelde dreht, infolge der Einwirkung wattloser Ströme im Läufer ein gleichmässiges Magnetfeld. Dieses gleichmässige Magnetfeld — gleichmässig wenigstens in praktischer Hinsicht — entspricht dem ebenfalls in praktischer Hinsicht gleichmässigen Drehfelde des Drehstrommotors. — Die Folge der wattlosen Ströme im Läufer ist ein bei synchronem Laufe des Motors nahezu verdoppelt erscheinender

Magnetisierungsstrom. Sehr deutlich ist dies zu bemerken bei solchen einphasigen Wechselstrommotoren, welche Schleifringläufer besitzen. Man schaltet beispielsweise zunächst nur die Ständerbewicklung ein, und zwar nur die Hauptwicklung unter Fortlassung der Hilfswicklung. Man wird dann einen bestimmten Magnetisierungsstrom „$i_m$“ am Strommesser sehen. Schaltet man nun mittelst des Anlasswiderstandes und unter Benutzung der Hilfsphase den Elektromotor vollständig ein, so dass er allmählich auf seine Tourenzahl heraufläuft, schaltet die Hilfsphase darnach aus und kontrolliert den nunmehrigen Erregerstrom, so wird man im Gegensatz zum Drehstrommotor, bei welchem der Magnetisierungsstrom beim Laufen des Motors durchaus ebenso gross ist, als bei Stillstand und ausgerücktem Läufer, finden, dass der Magnetisierungsstrom eines leerlaufenden ein-



Fig. 46. Einphasenmotor von Brown.

phasigen Wechselstrommotors nahezu doppelt so gross ist, als bei Stillstand, nämlich ungefähr „$2\ i_m$“.

Abgesehen hiervon fällt das Diagramm des einphasigen Wechselstrommotors nach Heyland fast genau so aus, wie das des dreiphasigen Motors, und ist infolgedessen sehr leicht daraus abzuleiten. Eine erschöpfende Darstellung der in Betracht kommenden Grössen hat in unübertrefflicher Weise Heyland selbst in der „Elektrotechnischen Zeitschrift“, Jahrgang 1896, gegeben.

Im Nachfolgenden geben wir, indem wir zum nächsten Kapitel übergehen, die Berechnung und die Prüfungsdaten eines einphasigen Wechselstrommotors mit Schleifringanker der „Magdeburger Elektromotoren-Fabrik“ Westerhüsen, nach dem Entwurf des Verfassers. Aus der Berechnung und den nachfolgenden Prüfungsdaten wird besser als durch längere theoretische Überlegungen der Unterschied der Wirkungsweise des Einphasenmotors gegenüber dem Drehstrommotor erkannt.

## Berechnung
eines einphasigen Wechselstrommotors des Verfassers für 110 Volt 3 PS, 6000 Polwechsel mit Schleifringläufer.

Die Daten, welche unserem Entwurf zu Grunde liegen, sind folgende:

Durchmesser des Läufers . . . . 23,5 cm $= a_i$,
Durchmesser des Ständers innen . 22,65 „
Durchmesser des Ständers aussen . 36,0 „ $= a_a$,
Länge des Läufers . . . . . . 15,0 „ $= b$,



Fig. 47. Einphasenmotor von Brown.

Nutenzahl des Ständers . . . . 60
Nutenzahl des Läufers . . . . . 48

Nutenform des Ständers . . Masse in mm,

Nutenform des Läufers . . Masse in mm.

Es ist die totale Windungszahl der Hauptphase

$$m_1 = \frac{V \cdot 30 \cdot 1{,}10 \cdot 10^8}{a_i \, \pi \cdot b \cdot D_l \cdot \text{Touren}}.$$

(Entwicklung der Formel analog der Drehstromformel, wobei 1,10 der Faktor der geometrischen Addition der einzelnen Spannungen jeder Spule ist.)

Die Hauptwicklung des Motors hat nun

$$m_1 = 90 \text{ Windungen},$$

dieselben sind auf 36 Nuten so verteilt, dass in jeder dieser Nuten 5 Drähte liegen. Der Querschnitt ist 9,6 $mm^2$, der Durchmesser 3,5 mm.

Demnach, da der Motor vierpolig für 1500 Touren gebaut ist, berechnet sich die mittlere Dichte im Luftraum.

$$D_l = \frac{110 \cdot 30 \cdot 1{,}10 \cdot 10^8}{22{,}5 \cdot 15 \cdot \pi \cdot 1500 \cdot 90} = 2550.$$

Der magnetische Querschnitt des Joches beträgt 113 $cm^2$, demnach die mittlere Dichte im Joch

$$D = 6000.$$

Der magnetische Querschnitt von 15 Zähnen beträgt im Mittel 144 $cm^2$, demnach die mittlere Dichte

$$D = 4700.$$

Der Kraftlinienweg im Luftraum ist 0,15 cm,
im Joch des Ständers . . . rund 30 „
in den Zähnen . . . . . „ 6 „

Daher betragen die Ampèrewindungen per Polpaar

| | | |
|---|---|---|
| Luft . . . . . | 0,8 · 0,15 · 2550 | = 305 |
| Joch . . . . . | 3 · 30 | = 90 |
| Zähne . . . . | 2 · 6 | = 12 |
| | | 407 |

Die Summe ist mit 2 zu multiplizieren und ergiebt sich bei 10% Zuschlag für Läufererregung zu

$$AW = 900.$$

Es ist nun $i_m$, der Magnetisierungsstrom bei Stillstand, d. h. bei pulsierendem Wechselstromfelde

$$i_m = \frac{900}{90 \cdot \sqrt{2}} = 7{,}1 \text{ Ampère}.$$

Demnach wird, wenn wir die Streuungskoeffizienten

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0{,}98$$

demnach $f = 24$ annehmen,

der Leerlaufstrom des Motors

$$i_0 = i_m \cdot 2 \cdot \frac{f+1}{f+2} = 13{,}6 \text{ Ampère.}$$ Man beachte diese und die folgenden Formeln.

Der maximale $\cos\varphi$ eines Einphasenmotors ist

$$\cos\varphi_{max} = \frac{f+2}{f+6}$$

in unserem Falle also $\cos\varphi_m = \frac{26}{30} = 0{,}87.$

Wir sehen hieraus, dass es niemals möglich ist, bei Einphasenmotoren die günstigen Verhältnisse der Mehrphasenmotoren zu erhalten.

Der Radius des Diagrammes ergiebt sich zu

$$R = 0{,}5 \cdot i_m \cdot (f+1)$$

oder

$$= 0{,}25 \cdot i_0 \cdot (f+2).$$

In unserem Falle ist demnach

$$R = 0{,}5 \cdot 7{,}1 \cdot 25$$

$$R = 88 \text{ Ampère.}$$

Dies entspricht einer Maximalleistung bei circa 70 % Nutzeffekt von rund 9 PS.

Wesentlich anders und ungünstiger gestalten sich aber die Verhältnisse, wenn wir, wie es in fabrikationsmässiger Herstellung wahrscheinlich ist, nur

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0{,}96 \text{ annehmen,}$$

daher ist

$$f = 11{,}5.$$

Dann wird, wenn

$$i_m = 7{,}1 \text{ Ampère ist,}$$

$$i_n = 13{,}1 \text{ Ampère}$$

$$\cos\varphi_{max} = \frac{13{,}5}{17{,}5} = 0{,}77$$

$$\text{Radius} = 44$$

$$\text{Maximalleistung} = 4\,^1/_2 \text{ PS.}$$

Im allgemeinen darf man das Ergebnis

$$\cos\varphi = 0{,}77$$

und

$$\text{Maximallast} = 4\,^1/_2 \text{ PS}$$

bei einem dreipferdigen Einphasenmotor noch gut nennen. Dies geht daraus hervor, dass die meisten Verwaltungen von Wechselstromcentralen für Motoren dieser Grösse nur mindestens

$$\cos\varphi = 0{,}7$$

fordern.

Ein Einphasenmotor des Verfassers der soeben besprochenen Type ergab z. B. unter der Bremse folgende Resultate:

| Tourenzahl | Volt | Ampère | PS | $\eta \cdot \cos\varphi$ | $\sqrt{\eta \cdot \cos\varphi}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1610 | 128 | 10 | 0 | | | |
| 1600 | 123 | 16 | 1,33 | 0,5 | 0,71 | |
| 1580 | 124 | 19 | 1,97 | 0,61 | 0,78 | |
| 1550 | 121 | 24 | 2,58 | 0,65 | 0,81 | Normal |
| 1550 | 120 | 30 | 3,23 | 0,65 | 0,81 | Normal |
| 1550 | 124 | 35 | 3,86 | 0,65 | 0,81 | |
| 1550 | 122 | 41 | 4,5 | 0,66 | 0,81 | 50 % Überlastung |
| 1550 | 124 | 45 | 5,17 | 0,68 | 0,82 | |
| 1450 | 119 | 56 | 5,45 | 0,61 | 0,78 | |

Bei $5\,^3/_4$ PS blieb er unter dem Bremsband stehen.

Es ist leider bei dieser Prüfung kein Wattmeter eingeschaltet worden, um die Werte des Nutzeffekts $\eta$ und der Phasenverschiebung $\cos\varphi$ zu trennen; indessen erhält man einen befriedigenden Überblick, wenn man $\cos\varphi$ darstellt aus

$$\sqrt{\eta \cdot \cos\varphi}.$$

$\cos \varphi_{max}$ ist augenscheinlich ca. 0,82, sodass sich

$$0,82 = \frac{f+2}{f+6}$$

und daher

$$0,82\,f + 6 \cdot 0,82 = f + 2$$

also

$$f = \frac{6 \cdot 0,82 - 2}{0,18} = 16$$

ergiebt. Daraus folgt

$$\sigma_1 = \sigma_2 \text{ im Mittel} = 0,97.$$

Der oben nachgerechnete Motor hat, wie erwähnt, seine Hauptphasenwicklung in 36 Nuten des Ständers. Die übrigen 24 Nuten enthalten die Hilfsphasenwicklung, und zwar hat jede Nute 6 Drähte von 3,2 mm Durchmesser, sodass, **im Gegensatz zu sonst üblichen Ausführungen**, die Dichte im magnetischen Felde der Hilfsphase grösser ist als in der Hauptphase.

Zum Anlassen des Motors wird Haupt- und Hilfsphase in Serie geschaltet und parallel zur Hilfsphase eine Flüssigkeitskapazität gelegt.

Die Ausführung des dreiphasig gewickelten Läufers bietet keine Besonderheiten.

## Prüfung von einphasigen Wechselstrommotoren.

Die Prüfung von einphasigen Wechselstrommotoren braucht des Näheren nicht beschrieben zu werden. Einmal haben wir im allgemeinen bereits bei Gleichstrommotoren die Grundsätze festgelegt, nach welchen Elektromotoren zu prüfen sind. Des weiteren aber ergiebt sich aus dem analogen Kapitel über Drehstrommotoren ganz von selbst, in welcher Weise die Prüfung von Einphasenmotoren zu geschehen hat. Dass natürlich bei Wechselstrommotoren der Hauptnachdruck bei der Prüfung auf das möglichst gute Anlaufen des Motors zu legen ist, dürfte von vornherein massgebend sein. Wenn man bedenkt, in wie starker Weise der gute Anlauf eines Einphasenmotors abhängig ist vom Magnetisierungsstrome und den Streuungsverhältnissen, so ergiebt sich, dass ein weit grösserer Prozentsatz einphasiger Motoren bei der Prüfung zu Anständen Anlass geben wird, als es bei Dreiphasenmotoren möglich ist. Thatsächlich sind dem Verfasser in seiner Praxis äusserst selten Fälle vorgekommen, in denen Drehstrommotoren wegen ungenügender Anzugskraft bei der Prüfung beanstandet werden mussten; dagegen ist es eine traurige Thatsache, dass bei Einphasenmotoren nicht peinlich genug bei der Prüfung verfahren werden kann, da eine ganze Anzahl teilweise aus Gründen, die im Motor ihre Ursache haben, andernteils wegen der Kapazität oder der Selbstinduktionsspule bei der Prüfung nicht durchgelassen werden können. Es ist wohl hierauf und zudem auf die Schwierigkeit der Behandlung der Kapazität zurückzuführen, dass unsere grössten Firmen, wie die „Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft“ und die Firma „Siemens & Halske“ sich mit der Herstellung von einphasigen Wechselstrommotoren überhaupt nicht beschäftigen. Thatsächlich ist die Fabrikation solcher Motoren eine derartige Spezialität, dass sie am besten mit Aussicht auf Erfolg und Nutzen nur von einer Spezialfabrik ausgeübt werden kann.

Gleichstrommotor des Verfassers für 20 PS. 900 Touren. Maasstab 1:10.

Gleichstrommotor des Verfassers für 48 PS. 700 Touren. Maasstab circa 1:25.



Verlag von S. Hirzel in Leipzig.

$\cos \varphi_{max}$

und dat

also

ergiebt.

Dei
wicklun
Hilfspha
messer,
Dichte i
phase.
Zu
und pa
Die
sonderh



Di
nicht b
Gleichst
zu prü
über D
Einphas
motoren
laufen
Wenn
motors
nissen,
Motoren
phasen
äussers
genüge
gegen
lich ge
teilweis
der Ka
gelasse
keit d
Firmen
„SIEME
stromm
solcher
auf Er

## Zweiter Hauptteil.

# Arbeitsübertragung.



# Entwurf, Berechnung und Beschreibung elektrischer Arbeitsübertragung.

Zu einer elektrischen Kraftübertragung gehören drei Teile, nämlich erstens die sogenannte Primärstation, in welcher der elektrische Strom erzeugt wird, demnächst die Leitung, durch welche der Strom seinem Verbrauchsorte zugeführt und von demselben auch wieder zur Primärstation zurückgeführt wird, und schliesslich der Elektromotor beziehungsweise bei Kraftverteilungen die Elektromotoren.

Über die Primärstation wollen wir nur mit einigen kurzen Worten das Nötigste sagen, da es nicht unsere Aufgabe ist, über Antriebsmaschinen und über Stromerzeuger zu berichten. Da indessen eine Stromerzeugungsstation, deren Strom zum Betriebe von Elektromotoren Verwendung findet, immerhin höheren Anforderungen ausgesetzt ist, als eine Stromerzeugungsstation, deren Strom Lichtzwecken gewidmet ist, so erscheint es nötig, wenigstens die unterscheidenden Merkmale hervorzuheben. Es ist vor allen Dingen darauf zu achten, dass die Antriebsmaschinen, seien es nun Dampfmaschinen, Turbinen oder andere Motoren, gross genug gewählt werden, um den unvermeidlichen Stössen in der Beanspruchung der Elektromotoren gewachsen zu sein. Auf eine besondere Regulierfähigkeit, auf konstante Tourenzahl pflegt man weniger zu sehen. Ebenso ist bei der Bemessung der Dynamomaschinen auf plötzliche starke Belastungsänderungen und Überlastungen bei der Wahl der Maschinen Bedacht zu nehmen. Ebenso ist Bedacht zu nehmen auf eine möglichst geringe Ankerrückwirkung und möglichst geringen Spannungsabfall der Dynamos. Bei Gleichstrommaschinen wird man, wenn eine möglichst gleichbleibende Spannung gefördert wird, trotzdem man im Bau von Nebenschluss-Dynamomaschinen heutzutage viel weiter ist, als noch vor wenigen Jahren, doch zweckmässig, an Stelle von Nebenschlussmaschinen Compoundmaschinen verwenden.

Über den zweiten Teil einer Kraftübertragung, über die Leitung, dürfte an dieser Stelle wenig zu berichten sein, da die Berechnung von Leitungen ebenfalls nicht zur Aufgabe dieses Teiles des Handbuches gehört. Es wird im übrigen bei der Beschreibung ausgeführter Anlagen auf besondere Konstruktionen hingewiesen werden.

Teilen wir nun das weite Gebiet elektrischer Arbeitsübertragungen ein, so werden wir von selbst auf zwei grosse Unterabteilungen hingewiesen, nämlich auf die Arbeitsübertragungen mittelst Gleichstrom und auf diejenigen mittelst Drehstrom. Jede dieser Abteilungen wird indessen noch eine besondere Einteilung erfahren dadurch, dass wir uns zunächst mit dem Entwurfe und der Berechnung und fernerhin mit der Beschreibung ausgeführter Anlagen zu beschäftigen haben werden.

Wir gehen demnach zunächst dazu über, an der Hand von Beispielen Gleichstrom-Kraftübertragungen zu entwerfen und zu berechnen.

## Entwurf von Gleichstromübertragungen.

Die Übertragung mittelst Gleichstrom war bekanntlich die erste Art der elektrischen Arbeitsübertragung, welche man kannte. Die nächstliegende Aufgabe war, eine bestimmte Kraft von $x$ PS, welche zum Beispiel an der Achse einer Dampfmaschine oder an einer Turbine an einem bestimmten Orte zur Verfügung stand, an diesem Orte indessen nicht ausgenutzt werden konnte, zu übertragen nach einem weiter entfernten Punkte, wo sie nutzbar gemacht werden konnte. Die Lösung der Aufgabe bestand darin, durch die zur Verfügung stehende Kraft eine Dynamomaschine anzutreiben, welche ihren Strom durch eine längere oder kürzere Leitung dem an dem entfernten Punkte befindlichen Elektromotor zuführte, während der Elektromotor den empfangenen Strom in Kraft umwandelte und an seiner Riemenscheibe nutzbar abgab. Handelt es sich um weiter nichts, als um diese einfache Übertragung einer Anzahl von Pferdestärken an einem entfernten Ort, woselbst die Kraft mittelst e i n e s Elektromotors nutzbar gemacht werden soll, so ist das Naheliegende, eine Hauptstrom-Kraftübertragung zu wählen. Es wird dann die Dynamomaschine sowohl, als auch der Elektromotor mit Hauptstrombewicklung der Magnetspulen ausgeführt; wir haben diese Art einer Kraftübertragung bei der Besprechung der Hauptstrom-Elektromotoren kennen gelernt.

Es ist üblich, der Hauptstromdynamo einen Parallelregulator zur Spulenbewicklung zu geben, um nach Bedarf beim Anlassen oder während des Betriebes die Spannung etwas regulieren zu können und dadurch unter Umständen die Tourenzahl des Motors zu beeinflussen. Eigentlich ist indessen dieser Parallelregulator überflüssig. Zur Messung und Kontrolle des von der Dynamo gelieferten Stromes ist ein Voltmeter und ein Ampèremeter notwendig. Beide Instrumente, auch das Voltmeter vor allen Dingen, sind bei Hauptstrom-Kraftübertragungen wenigstens um 25 % grösser zu wählen, als der normalen Leistung der Dynamomaschine entspricht. Wie wir wissen, ändert sich mit der Stromstärke auch die Spannung bei einer Hauptstrom-Kraftübertragung. Wenn man ganz vorsichtig sein will und vor allen Dingen da, wo man mit dem Elektromotor starke Anzugskräfte zu überwinden hat, sollte man die Messapparate bis zu 30 und 35 % grösser wählen, als der normalen Leistung der Übertragung entspricht.

Die Schalttafel in der Primärstation erhält ausser dem Strom- und Spannungsmesser nur noch einen doppelpoligen Ausschalter sowie eine doppelpolige Bleisicherung, abgesehen von etwa notwendigen Blitzsicherungen. An Stelle der Bleisicherungen pflegt man öfters einen sogenannten automatischen Kurzschliesser zu setzen. Dieser Apparat hat folgende Wirkung. Er ist eingerichtet in seinem Wesen wie ein automatischer Starkstromausschalter, d. h. er besteht aus einem umwickelten Eisenkern, dessen Windungen von dem Strome der Dynamomaschine durchflossen werden; während aber der Starkstromausschalter die Aufgabe hat, bei Überlastung durch das Anziehen eines Ankers einen Kontakt auszulösen, wodurch die Hauptleitung unterbrochen wird, löst beim automatischen Kurzschliesser die zu hoch gesteigerte Magnetisierung des Eisenkerns eine Bewegung aus, durch welche ein Kon-

takt geschlossen wird, welcher einen Kurzschluss zwischen den Enden der Magnetbewicklung der Hauptstromdynamo hervorbringt. Schliesst man aber bei einer Hauptstromdynamo die Magnetwicklung kurz, so geht kein nennenswerter Strom mehr durch die Magnetbewicklung, die Maschine entmagnetisiert sich fast ganz, verliert ihre Spannung, und die Folge davon ist augenblickliche Stromlosigkeit der ganzen Kraftübertragung. Der in die Augen fallende Vorzug eines solchen automatischen Kurzschliessers ist, dass er ohne jede Funkenbildung arbeitet, während der automatische Maximalausschalter den vollen Strom zu unterbrechen hat und daher gewöhnlich mit einer ganz bedeutenden Funkenbildung arbeitet, welche nach und nach die Zerstörung seiner Kontaktfedern im Gefolge hat.

Je nach der Entfernung der Sekundärstation, auf welcher der Motor steht, von der Primärstation und entsprechend der Anzahl von Pferdestärken, welche von einem zum anderen Orte übertragen werden sollen, wird man die Spannung der Anlage zu wählen haben. Voraussetzung ist, dass man die Leitung ökonomisch so berechnet, dass einerseits die Anlagekosten der Leitung, andererseits die in ihr verlorengehenden Pferdestärken ein Minimum werden. Es ist sehr leicht, diese beiden Faktoren gegeneinander auszugleichen.

Die Fälle, in welchen man bei einer Hauptstrom-Kraftübertragung mit der normalen Spannung von 110 oder 120 Volt auskommen wird, sind äusserst selten und beschränken sich auf kurze Entfernungen und geringe Maschinenkräfte. Da man zudem im Falle einer Hauptstrom-Kraftübertragung nicht darauf angewiesen ist, auf eine etwaige Beleuchtung Rücksicht zu nehmen, so ist man von vornherein in der Wahl der Betriebsspannung ziemlich ungebunden und wird daher schon mit Rücksicht auf die Kosten der Leitung, die Betriebsspannung möglichst hoch annehmen, falls dadurch nicht der Preis der Dynamomaschine und des Elektromotors etwa besonders derartig verteuert wird, dass die Vorteile der billigen Leitung hierdurch wieder aufgehoben werden. Bei mittelgrossen Anlagen und kleineren Entfernungen bis zu 1 km wird man günstig mit einer Spannung von 500 Volt etwa arbeiten. Andererseits ist man bei Gleichstrom-Kraftübertragungen mit Hauptstrommaschinen durch die Ankerwicklung an eine bestimmte Grenzspannung gebunden. Es ist jedenfalls nicht ratsam, über 2000 Volt Betriebsspannung hinauszugehen; wir möchten sogar eher bereits von dieser hohen Spannung abraten, da wirklich absolut betriebssichere Maschinen für diese Spannung sehr teuer zu sein pflegen.

Der Elektromotor bei einer Hauptstromübertragung erhält zweckmässig ebenfalls sowohl einen Strommesser, als auch einen Spannungsmesser, da, wie wir wissen, aus der Ablesung des Strommessers allein die Belastung nicht erkennbar ist.

Ferner wird man auf der Schalttafel des Motors einen doppelpoligen Ausschalter und eine doppelpolige Bleisicherung, sowie ebenfalls unter Umständen eine Blitzsicherung anzubringen haben. Vor den Elektromotor ist der zugehörige Anlasswiderstand einzuschalten. Im Falle auf der Sekundärstation eine zeitweilige Regulierung der Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors gewünscht wird, ist auch ein Parallelregulator anzubringen, dessen Wirkung wir bereits früher zu besprechen Gelegenheit hatten. Es ist indessen auf jeden Fall bei diesem Parallelregulator nicht ausser Acht zu lassen, dass er niemals kurz geschlossen werden darf, da in diesem Falle die

Ankerwicklung des Motors und demnach auch die Dynamo kurz geschlossen sein würde.

Als Beispiel für eine derartige Hauptstrom-Kraftübertragung wählen wir eine Anlage, welche bereits seit langen Jahren in der Fabrik von PAAS & SOHN in Barmen besteht. Die Firma verfügt über zwei voneinander etwa 300 m entfernte Fabrikräumlichkeiten. Während nun in der einen Fabrik überschüssige Kraft vorhanden war, war ein gewisser Kraftbedarf von etwa 100 PS in der zweiten Fabrik eingetreten. Es lag daher nahe, die überschüssige Kraft von dem einen Orte nach dem andern auf elektrischem Wege durch eine Hauptstrom-Kraftübertragung zu transportieren. Es wurde eine Dynamomaschine von 600 Volt und 120 Ampères mit Hauptstrombewicklung in der Primärstation aufgestellt, welche ihren Strom dem Elektromotor zuführte. Die Leitung bestand aus Kupferdraht von 8 mm Durchmesser = 50 qmm Querschnitt. Rechnerisch ergiebt sich bei einer Stromstärke von 120 Amp. in dieser Leitung von 600 m doppelter Länge ein Spannungsverlust von 26 Volt = 4,3 $^0/_0$ der Betriebsspannung. Der Motor erhält daher bei voller Belastung der Maschinenanlage eine Spannung von 574 Volt, eine Stromstärke von 120 Amp. und leistet bei einem Nutzeffekt von 92 $^0/_0$ 86 effektive Pferdestärken. Demgegenüber verbraucht die Dynamomaschine bei einer Leistung von 72000 Watt und einem Nutzeffekt von 92 $^0/_0$ 106 PS, sodass der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung $\frac{86}{106}$, d. h. 81 $^0/_0$ ist. Dies wäre allerdings nur möglich durch die verhältnismässig starke Leitung und die geringe Entfernung der beiden Maschinenstationen voneinander. Man ersieht aber aus diesem Beispiel, wie weit man in rationeller Weise die Entfernung zwischen den beiden elektrischen Maschinen vergrössern könnte. Nehmen wir an, die Entfernung wäre anstatt 300 m das Dreifache, nämlich 900 m, so würden wir einen Verlust von 78 Volt haben, wenn wir dieselbe Betriebsspannung beibehalten würden. Wir können aber die Betriebsspannung auf das Doppelte hinaufsetzen, sodass wir 1200 Volt und 60 Amp. Stromstärke erhalten. Es ist dann der Spannungsverlust 39 Volt, d. h. 3,25 $^0/_0$ von 1200 Volt. Da wir aber bei einer Kraftübertragungsanlage ruhig bis zu 10 $^0/_0$ Spannungsverlust zu gehen vermögen, so könnten wir in diesem Falle bis auf 120 Volt Verlust die Entfernung zwischen Primär- und Sekundärstation erweitern, d. h. auf das Dreifache der zuletzt angenommenen 900 m, also auf nahezu 3 km. Es würde dies noch eine vollständige ökonomische Kraftübertragung mit einer nicht allzu hohen Spannung ergeben. Allerdings wird es möglich sein, auch noch wesentlich weiter zu gehen, doch dürfte dem weniger die Gefährlichkeit höherer Spannungen in den Maschinen, als vielmehr zu schnell wachsende Leitungskosten des starken Kupferdrahts entgegenstehen. Weitere Entfernungen mit Gleichstrom zu nehmen, ist nur möglich durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Hauptstrom-Dynamomaschinen und Hauptstrommotoren. Dies ergiebt indessen ein sehr kompliziertes System, welches allerdings in elegantester Weise von der „Compagnie de l'Industrie Electrique in Genf" nach den Patenten des Herrn THURY ausgearbeitet worden ist, indessen, wie wir weiter oben bereits zu bemerken Gelegenheit hatten, immerhin gegenüber den einfachen Drehstromsystem eine besser zu vermeidende Komplikation bietet.

Eine noch einigermassen einfache Lösung einer Gleichstrom-Kraftübertragung mit Hauptstrommaschinen für sehr hohe Spannung wurde früher vom

Verfasser angewendet und in der „E. T. Z." beschrieben. Sie besteht darin, dass man zwei Hauptstromdynamos hintereinander schaltet und ebenso auf der Sekundärstation oder auch auf zwei verschiedenen Sekundärstationen zwei Hauptstromelektromotoren hintereinander schaltet. Es ist indessen dann nötig, ausser den beiden Hauptleitungen noch einen Mittelleiter zu ziehen (Fig. 48), durch welche diese Kraftübertragung gewissermassen in zwei voneinander unabhängige Übertragungen aufgelöst wird. Es ist nicht einmal nötig, dass die beiden Elektromotoren gleich gross sind. Allerdings müssen sie bei voller Belastung mit derselben Stromstärke arbeiten; falls sie also nicht gleiche Leistung besitzen sollen, sind sie für verschiedene Spannungen zu konstruieren. Bedingung ist aber, dass die beiden Dynamomaschinen den beiden Elektromotoren in ihrer Grösse entsprechen. Sind also die Elektromotoren einander nicht gleich, so dürfen auch die Dynamomaschinen einander nicht gleich sein. So wäre es z. B. möglich, eine Kraftübertragung mit 3000 Volt Gleichstrom und 50 Ampère Stromstärke nach diesem Dreileitungssystem über eine geraume Strecke auszuführen. Wir könnten z. B. annehmen, dass die eine Dynamomaschine 2000 Volt und die andere Dynamomaschine 1000 Volt, jede aber die gleiche Stromstärke von 50 Ampère bei voller Belastung liefert. Dementsprechend würde der eine grössere Motor, wenn wir einen Spannungsverlust von $10^0/_0$ annehmeu, etwa 112 effektive PS, der andere dagegen 56 effektive PS bei voller Belastung leisten. Sind die Motoren beide voll belastet, sodass ihre Stromstärke gleich ist, in unserem Falle also hier 50 Ampère beträgt, so fliesst durch den Mittelleiter kein Strom. Sind die Motoren dagegen ungleich belastet, und hat der eine etwa eine Stromstärke von 40, der andere dagegen nur von 30 Ampère, so fliesst durch den Mittelleiter natürlich der Differenzstrom von 10 Ampère. Derartige Anlagen sind durchaus betriebssicher; es interessiert hier, darauf hinzuweisen, dass schon vor langen Jahren eine der ersten Kraftübertragungsanlagen der Maschinenfabrik „Oerlikon" durch deren damaligen Chefingenieur Brown nach diesem System ausgeführt worden ist. Diese Anlage befindet sich zwischen den Orten Solothurn und Kriegstetten und hat von Anfang an sehr befriedigend gearbeitet.

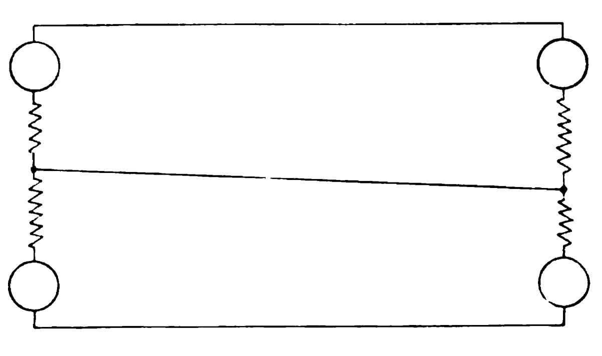


Fig. 48.

Nachdem wir so gesehen haben, wie die Aufgabe einer Kraftübertragung mittelst Gleichstrom durch das Hauptstromsystem zu lösen ist und dass sie nur dann zu lösen ist, wenn sekundär nur ein oder höchstens zwei Elektromotoren in Betracht kommen, wenden wir uns zu den häufiger vorkommenden Fällen, wo eine Kraft nach verschiedenen Punkten gleichzeitig zum Betriebe einer ganzen Anzahl von Elektromotoren übertragen beziehungsweise verteilt werden soll. Hier kommt lediglich als Primärdynamo die Nebenschlussmaschine oder, wie oben auseinandergesetzt, noch besser die Compoundmaschine in Frage. Die Kontroll- und Sicherheitsapparate auf der

Primärstation sind nicht verschieden von denjenigen, welche wir auf dem Schaltbrette einer jeden Beleuchtungsanlage finden. Man wird im wesentlichen für die Dynamomaschine ein Ampèremeter und ein Voltmeter vorsehen; ist mehr als eine Primärdynamomaschine vorhanden, z. B. zwei oder drei, welche in Parallelschaltung arbeiten, so ist es erforderlich, einer jeden Maschine einen Strommesser und einen Spannungsmesser zu geben. Ferner erhält die Dynamomaschine wie üblich einen doppelpoligen Ausschalter und doppelpolige Bleisicherung und arbeitet auf ein paar Sammelschienen, an welche die einzelnen Elektromotorenleitungen, soweit die Elektromotoren wenigstens durch getrennte Leitungen gespeist werden, angeschlossen sind.

Das Umfangsgebiet einer derartigen Kraftverteilung mit Gleichstrom ist ein nicht allzu grosses. In gewöhnlichen Fällen werden derartige Kraftverteilungen innerhalb von Fabriken angewendet und erheischen dann bereits eine Spannung von 220 Volt. Es ist auch nach den neueren Erfahrungen durchaus zulässig und zweckdienlich, mit einer Spannung von 440 Volt oder 500 Volt bei derartigen Kraftverteilungsanlagen zu arbeiten. Beispielsweise besteht in London die Centrale einer Company, welche innerhalb mehrerer Häuserviertel zu Kraftverteilungszwecken Gleichstrom zu 530 Volt abgiebt. Die Centrale erfreut sich eines regen Konsums, und die Elektromotoren, soweit sie von erstklassigen Firmen geliefert sind, laufen durchaus zufriedenstellend. Immerhin aber ist es einerseits nicht möglich, die Spannung von **Nebenschlussmotoren,** welche bei dieser Art von Kraftverteilung im wesentlichen in Frage kommen, bedeutend über 500 Volt zu erhöhen, da dem fabrikationsmässige Schwierigkeiten gegenüberstehen; andererseits ist mit einer Spannung von 500 Volt unter Annahme ökonomischer Verluste in den Leitungen kein grosses Gebiet zu versorgen möglich. Unsere grossen Centralen in den Städten wurden früher für 220 und in den letzten Jahren für 440 Volt gebaut und sind doch nicht im entferntesten genügend für einen ausgedehnten Elektromotorenbetrieb. Das beste Beispiel hierfür bietet die Anlage der Berliner Elektricitätswerke, deren Kabelnetz ausserordentlich hohe Summen verschlungen hat und die infolge des steigenden Konsums gezwungen waren, in verhältnismässig geringen Entfernungen voneinander einzelne miteinander parallel arbeitende Centralen und Unterstationen zu errichten, nur um das Gebiet einer jeden Centrale oder Unterstation so klein wie möglich zu machen.

Es eignet sich daher die elektrische Kraftverteilung mit Gleichstrom unter Verwendung von Spannungen bis zu 500 Volt mehr für Fabriken und andere räumlich nicht zu ausgedehnte Örtlichkeiten, als für die Kraftverteilung in grossem Massstabe auf einem grossen Gebiete. Dass diese letztere Frage ihre Lösung durch das Drehstromsytem längst gefunden hat, wissen wir bereits.

Kehren wir wieder zum Schaltbrett unserer Maschinenanlage auf der Primärstation zurück. Indem wir uns als vorliegenden Fall die Kraftverteilung innerhalb einer Fabrik mit Gleichstrom von beispielsweise 220 Volt vor Augen führen, ist es erforderlich, von den Sammelschienen der Schalttafel die grösseren Elektromotoren durch besondere Leitungen zu speisen. Kleinere Elektromotoren können sehr wohl durch eine gemeinsame Leitung, von welcher sie nacheinander abgezweigt werden, zusammen ihren Strom erhalten. Demgemäss wird jedenfalls von den Sammelschienen aus eine Anzahl von Leitungen abzweigen zu einzelnen Motoren oder Motorengruppen. Eine jede dieser Leitungen ist hinter den Sammelschienen mit einem Ausschalter und

einer doppelpoligen Bleisicherung zu versehen. Zweckmässig wird in die Leitung noch ein Stromindicator eingeschaltet, mittels dessen der Schaltbrettwärter in der Lage ist, zu erkennen, ob der von der betreffenden Leitung gespeiste Elektromotor sich im Betriebe befindet oder nicht. Es ist dies analog, wie man es bei Bogenlampenleitungen auf dem Schaltbrett zu machen pflegt.

Die einzelnen Elektromotoren, mögen es nun Nebenschluss- oder Hauptstrommotoren sein, sind an Ort und Stelle ebenfalls zu sichern und zwar zweckmässig nicht durch Bleisicherungen, sondern durch einen Maximalausschalter. Verschiedentlich wird auch zur Erhöhung der Betriebssicherheit in die eine Leitung ein Maximalausschalter, in die andere Leitung ein Minimalausschalter gesetzt. Es hat dies den Vorteil, dass beim Versagen des Stroms der Motor nicht nur momentan stehen bleibt, sondern dass auch seine Leitung durch den Minimalausschalter unterbrochen wird. Wollte dann ein Unbefugter versuchen, den Minimalausschalter wieder einzuschalten, ohne vorher den Anlasswiderstand auszurücken, so würde der in der anderen Leitung sitzende Maximalausschalter infolge des hohen Stromstosses herausfliegen, sodass jede Gefahr für die Maschine ausgeschlossen ist. Diese Einrichtung besteht beispielsweise und hat sich bewährt in der Königl. Eisenbahn-Hauptwerkstatt zu Oppum. Zweckmässig wird ferner jeder Elektromotor in der einen Leitung mit einem einpoligen Ausschalter versehen, während in der anderen Leitung der Anlasswiderstand liegt. Es ist auf diese Weise möglich, die Leitung ganz von dem Elektromotor und durch den auf dem Schaltbrett der Primärstation sitzenden Ausschalter auch vollständig von der Primärmaschine zu trennen, sodass etwaige Erdschlüsse leicht entdeckt werden können.

Wir wollen an dieser Stelle nicht mehr eingehen auf die mannigfache Verwendungsart der Elektromotoren in der Praxis, sondern wollen uns dies für ein besonderes Kapitel vorbehalten, welches wir erst am Schlusse unseres Bandes zu betrachten beabsichtigen. Es ist für den Antrieb gleichgültig, welche Motorenart, ob Gleichstrommotoren oder Drehstrommotoren, mit den betreffenden Arbeitsmaschinen zusammen arbeiten, und deshalb notwendig, erst die elektrische Arbeitsverteilung im allgemeinen durchzusprechen, um nachher auf die einzelnen Details zu kommen.

Wie schon auseinandergesetzt, wird die Gleichstromkraftverteilung mittels einer grösseren Anzahl von Gleichstrommotoren nach modernen Prinzipien mit einer Spannung von 220 Volt, höchstens 440 oder 500 Volt vorgenommen. In den meisten Fällen werden wir wohl in der Praxis in Fabriken, Bergwerken und ähnlichen Etablissements einer Verteilungsspannung von 220 Volt begegnen schon aus dem einfachen Grunde, weil bei dieser Spannung eine gleichzeitige Beleuchtung ohne Schwierigkeiten mit Glühlampen von 220 Volt Spannung durchführbar ist. Indessen findet man auch nicht selten die Anschauung vertreten, dass bei einer grösseren elektrischen Anlage für Kraft und Licht zweckmässig die Beleuchtung und die Kraftverteilung jede von einer besonderen Dynamomaschine aus gespeist werden soll, um Rückwirkungen des schwankenden Motorbetriebes auf die Lichtspannung zu vermeiden. Wir wissen aber zur Genüge, dass dieser Fall nach modernen Anschauungen im Dynamomaschinenbau eigentlich nur eintreten kann durch starke Schwankungen nicht in der Spannung der Dynamomaschine, sondern im Leitungsverluste; so kann es kommen, dass entfernt brennende Glühlampen, welche an dieselbe Leitung angeschlossen sind, wie Elektromotoren

mit stark schwankendem Kraftbedarf, erheblich in ihrer Leuchtkraft variiren. **Hieraus geht aber hervor, dass es keineswegs nötig ist, eine besondere Lichtmaschine und eine besondere Kraftmaschine aufzustellen, sondern dass es höchstens notwendig wird, ein getrenntes Leitungsnetz für die Elektromotoren und ein gleiches für die Beleuchtung anzuordnen, damit nicht die Verluste im Motornetze sich übertragen auf die Lichtstärke der Glühlampen.**

Im allgemeinen muss aber gesagt werden, dass man in neuerer Zeit auch unter Umständen, welche die Anwendung einer Gleichstromkraftverteilung sehr wohl zulassen, mehr und mehr zu dem für den Elektromotorenbetrieb vorteilhafteren Drehstromsystem überzugehen im Begriff steht. Hierdurch kommen wir zu einem weiteren Teile unserer Betrachtung, den

## Kraftverteilungen mittels Drehstrom.

Was wir bei Besprechung der Primärstationen für Gleichstromkraftverteilungen sagten, gilt in ganz gleicher Weise für die Primärstationen von Drehstromkraftübertragungen. Nur sind hier die Anforderungen, welche der Motorenbetrieb an einen Drehstromgenerator stellt, im allgemeinen schwieriger zu erfüllen, da bei der Drehstromdynamo die Armaturrückwirkung wesentlich durch den mattlosen Strom der Drehstrommotoren verstärkt wird. Rechnet man doch im allgemeinen, dass ein Drehstromgenerator bei induktionsloser Belastung nur ungefähr den vierten Teil des Spannungsabfalls zeigt, wie bei reiner Motorenbelastung. Es ergiebt sich daraus von vornherein die Unmöglichkeit, bei stark schwankendem Drehstrommotorenbetriebe die Spannung konstant zu halten; dieselbe wird immer in gewissen Grenzen der Belastung entsprechend eine schwankende sein. Glücklicherweise kommt es nun beim Drehstrommotorenbetrieb sehr wenig auf Spannungsschwankungen an. Direkt wird durch eine in gewissen Grenzen bleibende Spannungsverminderung kein Einfluss auf die Motoren ausgeübt. Wird der Spannungsabfall allerdings zu gross, so tritt eine vollständige Änderung des Motordiagrammes ein, und es kann unter Umständen vorkommen, dass bei stark verminderter Spannung der Motor aus dem Takte fällt, d. h. stehen bleibt. Gut gebaute Drehstrommotoren vertragen indessen ganz ruhig eine Spannungsverminderung um 25—30 %, ohne ihre Fähigkeit, die normale Belastung durchzuziehen, einzubüssen. Dass sie allerdings in diesem Falle mit wesentlich höher scheinbarer Stromstärke und bedeutend höherer Phasenverschiebung laufen, dürfte nach den früheren Ausführungen über die Streuungsverhältnisse und das Heylandsche Diagramm ohne weiteres klar sein.

Bei einer Drehstromkraftübertragung ist es ganz gleichgültig, ob dieselbe in der Nutzbarmachung der gesamten Kraft durch einen Elektromotor oder durch mehrere Elektromotoren besteht. Auf die Primärstation hat dies keinerlei Einfluss. Die Primärstation einer Drehstromkraftübertragung hat, wenn sie lediglich einen Drehstromgenerator erhält, mit folgenden Apparaten zu rechnen. Auf dem Schaltbrette der Maschinenstation muss sich wenigstens in zweien von den drei Phasenleitungen ein Ampèremeter befinden. In jede Leitung ein Ampèremeter einzusetzen, ist natürlich vollständig überflüssig. Es ist ferner ein Voltmeter mit einem Voltmeterumschalter anzuordnen, sodass die Spannungen in allen drei Phasen controllirt werden können. Des

weiteren ist lediglich ein dreipoliger Ausschalter und eine dreipolige Bleisicherung notwendig. Treibt der Drehstromgenerator direkt ohne Zwischenschaltung eines Dreiphasentransformators verschiedene Drehstrommotoren, so sind auch hier zweckmässig die grösseren Elektromotoren durch besondere Leitungen von Schaltbrett aus zu speisen, während man kleinere Elektromotoren zusammen in Gruppen auf ein und dieselbe Leitung überträgt. Das Bild ist demnach genau dasselbe, wie bei einer Gleichstromkraftverteilung, bei welcher von den Sammelschienen der Schalttafel aus einzelne Motoren und Motorengruppen ihren Strom erhalten.

Anders wird das Bild, wenn es sich nicht darum handelt, innerhalb einer Fabrik oder überhaupt innerhalb eines von der Maschinenstation nicht weit entfernten Rayons Motoren zu betreiben, sondern wenn die Aufgabe besteht, den Drehstrom erst nach einem entfernten Punkte hinzusenden, um ihn dort zum Betriebe eines oder mehrerer Elektromotoren zu verwenden. Es wird sich alsdann um eine weite Entfernung und demzufolge um eine höhere Spannung handeln. Es wird also der Drehstromgenerator für etwa 2000—5000 Volt ausgeführt, um durch diese hohe Spannung die Leitungskosten ökonomisch zu gestalten. Es wird dann zwei Möglichkeiten geben. Entweder wird die ganze Kraft nach einem entfernten Orte mittels hoher Spannung übertragen, um dort zum Betrieb von Motoren, unter Umständen auch zur Beleuchtung, Verwendung zu finden. Oder aber es besteht die Aufgabe, nach mehreren Stellen hin den hochgespannten Drehstrom zu erhalten und demzufolge in verschiedenen Unterstationen die notwendigen Umformungen auf niedrig gespannten Drehstrom vorzunehmen, welcher zu Motorenbetrieb und unter Umständen auch zu Beleuchtung verwendbar ist. Beide Fälle sind nach dem heutigen Standpunkt der Drehstromtechnik leicht zu lösende Aufgaben. Der Bau von hochgespannten Drehstrommaschinen von 5000 und sogar 10000 Volt bietet keine Schwierigkeiten mehr, falls beim Entwurf und der Ausführung der Generatoren Sorgfalt in der Konstruktion, sowie äusserste Aufmerksamkeit und peinliche Gewissenhaftigkeit in der Werkstatt aufgewendet werden. Man möchte sagen, dass es leichter ist, einen gut funktionierenden Drehstromgenerator hoher Spannung auszuführen, als einen ruhenden Drehstromtransformator derselben Spannung; es beruht dies zum Teil darauf, dass auf den Spulen der Transformatoren erheblich mehr Windungen sich befinden, als auf der Ankerwicklung der Drehstromgeneratoren, was allerdings seinen Grund in der Hauptsache darin hat, das hochgespannte Drehstromgeneratoren für hohe Leistungen, Transformatoren aber gewöhnlich für niedrige Leistungen gebaut werden. Jedenfalls bietet wie gesagt die Ausführung von Hochspannungsgeneratoren für Drehstrombetrieb nicht die geringste Schwierigkeit. Die Messapparate, sowie die Schalter und Bleisicherungen für Hochspannungsbetrieb sind ebenfalls in neuerer Zeit in geeignetster Weise durchkonstruiert und infolge ihrer vielseitigen Verwendung in den in den letzten Jahren erbauten Überlandcentralen auch ausprobiert worden. Der Bau von Hochspannungsleitungen hat im Anfang viele Schwierigkeiten verursacht, die zum grossen Teil in der mangelhaften Form und Ausführung der Porzellanisolatoren und zum anderen Teile in der Unzuverlässigkeit der Blitzableiter begründet waren. Seitdem aber brauchbare Isolatoren für sehr hohe Spannungen und ebenso genügende und betriebssichere Konstruktionen von Blitzableitern existieren, ist der Betrieb hochgespannter Fernleitungen erheblich betriebssicherer geworden. Dass

natürlich eine ausgedehnte sich unter Umständen über Hunderte von Kilometern verzweigende Hochspannungsfernleitung mehr Störungen ausgesetzt sein wird, als eine im Innern eines Etablissements verlaufende harmlose Niederspannungsleitung, ist klar; es wird auch wohl kaum eine Überlandcentrale mit ausgedehntem Fernleitungsnetz existieren, welche nicht zu Zeiten eine ganze Anzahl von Monteuren mit der Reparatur ihrer Fernleitungen vornehmlich nach Gewittern zu beschäftigen gezwungen ist; indessen sind wie gesagt die Störungen erheblich vermindert worden und werden durch die sich von Jahr zu Jahr steigernden Erfahrungsresultate mit Sicherheit in nicht allzu ferner Zeit vollständig als beseitigt gelten dürfen.

Bei dem Bau der Fernleitungen für Hochspannungskraftübertragungen ist nicht ausser Acht zu lassen, dass verschiedene Behörden in Frage kommen, welche besondere Vorschriften über die Ausführung solcher Anlagen erlassen haben oder in konkreten Fällen erlassen. Bei der Projektierung von Fernleitungen hat der ausführende Ingenieur in erster Linie mit der Reichspostverwaltung zu thun. Die Reichspostverwaltung verlangt, dass eine elektrische Fernleitung so geführt werden muss, dass bei eventuellem Umsturz der Leitungsmasten oder beim Reissen eines Drahtes etwa in der Nähe befindliche Telephon- oder Telegraphenleitungen in jeder Weise gegen die Berührung mit den Starkstromleitern geschützt sind. Es ist deshalb nicht nur nötig, auf Chausseen und Wegen, auf deren einer Seite sich eine staatliche Leitung befindet, die private Starkstromleitung auf der anderen Seite zu führen, sondern es sind bei Kreuzungen Schutznetze und Fangbügel erforderlich. Ferner verlangt die Reichspostverwaltung, dass eine jede Beeinflussung der Telephonleitungen durch Induktionsströme ausgeschlossen sei. Wenn nun auch beim Gleichstromsystem derartige Beeinflussungen nicht anzunehmen sind, da die modernen Gleichstrommaschinen eine genügende Lamellenzahl des Kollektors zu haben pflegen, um eine Schwankung der Stromstärke zu verhindern, während andererseits bei einphasigen Wechselstromleitungen die Ströme der beiden Leitungen sich, was ihre magnetische Wirkung auf benachbarte Leitungen anbetrifft, gegenseitig aufheben, hat es beim Drehstromsystem einige Mühe gekostet, bis man in bindender Weise die Beeinflussung benachbarter Schwachstromleitungen durch die von den drei Drehstromleitungen ausgehenden Kraftlinienkreise beseitigt hat. Indessen ist man schon seit einigen Jahren zu dem Resultate gelangt, abwechselnd die Drahtführung der drei Drehstromleitungen so anzuordnen, dass möglichst von Mast zu Mast eine Leitung gegen die beiden anderen ihre Lage verändert. Es wird durch diese fortwährende Veränderung der gegenseitigen Lage der drei Drähte die Induktionseinwirkung auf Schwachstromdrähte in praktisch befriedigender Weise verhindert, sodass auch die Reichspostverwaltung sich durch diese Anordnung befriedigt erklärt hat.

Ferner pflegt die Reichspostverwaltung auf Kosten der eine Fernkraftübertragung ausführenden Firma in allen in Betracht kommenden Telephonämtern die Telephonleitungen zu sichern.

Eine zweite Behörde, mit welcher die ausführende Firma zu thun hat, ist der Kreisausschuss des betreffenden Landkreises, welchem die Überwachung und Instandhaltung der Kreischausseen und öffentlichen Wege obliegt. Unter Umständen kommt auch die Regierung des betreffenden Regierungsbezirks in Frage, falls es sich lediglich um solche Chausseen handelt,

welche als sogenannte Provinzialchausseen der Aufsicht der Regierung unterstehen.

Der Kreisausschuss, beziehungsweise die Regierung hat dafür zu sorgen, dass der Verkehr auf den öffentlichen Wegen durch die Leitungsführung weder eine Störung erleidet, noch durch gefahrdrohende Erscheinungen beeinflusst wird. Diese staatlichen Behörden pflegen deshalb die Erlaubnis zur Benutzung der öffentlichen Wege für die Leitungsführung von einer Anzahl von Vorschriften abhängig zu machen. Es wird hier im wesentlichen die Entfernung der einzelnen Leitungsmasten voneinander vorgeschrieben, ferner eine Anordnung über die Anzahl der auf der Strecke anzuordnenden Blitzableiter gegeben und schliesslich gewöhnlich sehr strenge Vorschriften bei Wegkreuzungen und in der Nähe menschlicher Wohnungen über die Anordnung zweckmässiger Schutznetze erlassen.

Es ist daher der Bau von Fernleitungen für Hochspannungskraftverteilungen eine Aufgabe, welche vielseitige Erfahrung auf diesem speciellen Gebiete voraussetzt.

Je nachdem die Übertragung zum Betriebe von Motoren an einem bestimmten Punkte oder zum Betriebe von Elektromotoren an mehreren Orten dient, wird entweder am Endpunkt der Leitung sich der Transformator befinden oder aber von der Fernleitung Abzweigungen zu verschiedenen Transformatorenstationen führen.

Der erstere Fall ist ausserordentlich selten und kommt fast nur da in Betracht, wo die Ausnutzung einer billigen Naturkraft zur Versorgung eines entfernten Ortes mit elektrischer Energie beabsichtigt ist. Weit häufiger sind in letzter Zeit die sogenannten Überlandcentralen geworden.

Unter einer Überlandcentrale versteht man ein elektrisches Werk, welches vermittels einer einzigen Primärstation nach allen Seiten hin unter Vermittelung von Fernleitungen einer ganzen Anzahl von Ortschaften, deren jede eine Unterstation bildet, elektrische Energie in Form von hochgespannten Drehstrom zuführt. Die Primärstation zur Erzeugung des hochgespannten Drehstroms liegt gewöhnlich in zweckmässiger Weise in der Mitte des Konsumgebietes. In den in Betracht kommenden Ortschaften wird der zugeführte Hochspannungsstrom durch gewöhnliche Transformatoren auf die Gebrauchsspannung umgeformt.

Derartige Überlandcentralen, welche zum grossen Teil Wasserkräfte ausnutzen, sind in letzter Zeit ausserordentlich viel entstanden, nicht immer in finanzieller Hinsicht zu befriedigenden Resultaten führend.

Man kann an diesen Überlandcentralen, welche gegenwärtig den höchsten Standpunkt der elektrischen Kraftübertragung darstellen, so recht erkennen, welche Fortschritte die Arbeitsübertragung gemacht hat, seitdem sie ihre Kinderschuhe ausgetreten hat. Es ist ein gewaltiger Schritt von dem Betriebe des ersten Elektromotors, welcher von seiner ihn speisenden Dynamomaschine nur wenige Meter entfernt stand, bis zu dieser neuesten Errungenschaft unserer Technik, wo in Entfernungen von zwanzig und mehr Kilometern ein Elektromotor seine Betriebskraft erhält.

Mit grosser Gewissenhaftigkeit müssen auch bei solchen hochgespannten Kraftverteilungen die Transformatorenstationen an den einzelnen Konsumpunkten errichtet werden. Die Einführung hoher Spannung in dicht bewohnten Orten ist natürlich von vornherein ausgeschlossen; daher werden wir solche Transformatorenstationen fast immer ausserhalb der Städte und

Dörfer finden. Es wird zweckmässig sein, jedem einzelnen derartigen Transformator Messapparate beizugeben und ebenso Schaltapparate, damit eine Kontrolle jederzeit ohne Störung der Primärstation möglich ist.

Von der Niederspannungsbewicklung des Transformators ausgehend, durchzieht nun die eigentliche Verbrauchsleitung den betreffenden Ort und zwar in den meisten Fällen zur gleichzeitigen Abgabe von Licht und Kraft. Vorzuziehen ist es allerdings, das Lichtnetz von Kraftnetz gerade bei Drehstrom zu trennen. Wenn schon bekanntermassen Drehstrommotoren auf die Konstanz der Spannung eines Drehstromgenerators einen sehr üblen Einfluss haben, so steigert sich die Ungleichmässigkeit der Spannung bei Fernkraftübertragungen noch durch den Leitungsverlust in der Fernleitung und vor allen Dingen durch die wechselnde induktive Belastung des Transformators. Es ist bekanntlich leicht, Transformatoren für Lichtzwecke d. h. für induktionslose Belastung zu bauen; nicht ganz so leicht ist es, wie der Praktiker weiss, Transformatoren für stark wechselnden Elektromotorenbetrieb zu konstruieren, welche ohne grossen Spannungsabfall arbeiten sollen. Man ist hierbei gewöhnlich zur Wahl einer grösseren Type gezwungen. Aus diesem Grunde halten wir es für viel zweckmässiger, wenigstens bei schwankenden und überwiegendem Elektromotorenbetriebe, einen besonderen Transformator für Licht und einen besonderen für den Elektromotorenbetrieb aufzustellen und demgemäss die beiden Niederspannungsnetze voneinander ganz getrennt zu halten.

Wir wollen hiermit unsere Ausführungen über den Entwurf elektrischer Kraftübertragungen schliessen. Wenngleich man über dieses Thema noch aus der Erfahrung heraus ziemlich viel anfügen könnte, so scheint es uns doch richtiger, den Leser durch die Beschreibung wirklich ausgeführter Anlagen und durch die Aufführung einiger Spezialkonstruktionen verschiedener bekannter Firmen auf wesentliche Punkte aufmerksam zu machen.

## Beschreibung ausgeführter Anlagen.

In der gleichen Weise, wie wir bei der allgemeinen Betrachtung elektrischer Kraftübertragungen mit dem Gleichstrom-Hauptstromsystem begonnen haben, liegt es nahe, dem Leser eine der vielen von der Compagnie de l'Industrie Electrique ausgeführten Anlagen zu beschreiben, in welcher das von dieser Gesellschaft zur höchsten Vervollkommnung durchgebildete System Thury zur Anwendung gelangt ist. Wir haben zwar mehrfach in diesem Werke betont, dass unserer Ansicht nach die Anwendung des Drehstromsystems für derartige Fälle nach modernen Anschauungen die richtigere sein würde und dass das Thurysche System eine Fülle selbst gewählter Schwierigkeiten in eleganter und bewunderungswürdiger Weise löst, während andere Firmen den Schwierigkeiten durch die Anwendung des einfachen Dreiphasensystems vielleicht sogar unter Ersparung von Anlagekosten aus dem Wege gehen würden; immerhin ist das System so interessant, dass es unrichtig wäre, dasselbe in unserem Werke zu übergehen; wir lassen deshalb die Beschreibung einer der vielen Thuryschen Anlagen hier folgen und zwar die Beschreibung der elektrischen Kraftverteilung von Chaux-de-Fonds und von Locle.

I.

## Elektrische Kraftverteilung von Chaux-de-Fonds und Locle.

Die Aar, welche die Kraft für das Primärwerk auf ihrem Laufe durch das Thal von Travers liefert, fliesst durch eine Schlucht und ergiesst sich dann in den Neuchateler See. Auf diesem Laufe hat sie auf einem Wege von 40 km ein totales Gefälle von 340 m.

Seit einigen Jahren ist dieses Gefälle unbestrittenes Eigentum der Gemeinden des Thales von Travers; diese nutzen oberhalb und unterhalb von Noiraique in dem Werke von Plan-de-l'Eau ein Gefälle von 30 m aus, welches eine Kraftverteilung speist zur Versorgung der Orte Noiraigue, Travers, Couvet und Fleurier. Das folgende Gefälle von 52 m liefert die nötige Kraft, um das für den Ort Chaux-de-Fonds erforderliche Quellwasser auf eine Höhe von 500 m zu heben.

Die Ausnutzung des dritten Falles ist eine Gerechtsame der drei Gemeinden Chaux-de-Fonds, Locle und Neuchatel, und hierauf bezieht sich diese Beschreibung.

Ein viertes Gefälle von 85 m ist für die Verteilung von Licht und Kraft für Neuchatel ausgenutzt.

Nachdem die Ausnutzung der Kräfte den Gemeinden Chaux-de-Fonds und Locle gestattet war, gab diese im Jahre 1894 die Veranlassung zu einer internationalen Bewerbung, welche zum Zweck hatte die Schaffung und Nutzbarmachung der Wasserkraft, ihre Umformung in elektrische Energie und ihre Übertragung in die etwa 52 km entfernten Städte Chaux-de-Fonds und Locle.

Infolge dieser Konkurrenzausschreibung, an welcher sich die sechs grössten elektrischen Firmen des Festlandes beteiligten, entschied sich die Jury für das Projekt, welches die Gesellschaft für elektrische Industrie empfahl und das sich auf die Anwendung von Gleichstrom mit konstanter Stromstärke stützte.

Die Gründe, welche den Entschluss der Sachverständigen herbeigeführt haben, sind klar in einem Bericht der Jury über die Ausnutzung der Wasserkräfte der Aar auseinandergesetzt. Der Bericht ist von M. Palaz, Professor an der Universität zu Lausanne, verfasst. Die Gründe verdienen kurz erwähnt zu werden, denn zu Beginn ihrer Arbeit hatten sich sämtliche Mitglieder der Jury ohne Ausnahme für die Anwendung des Dreiphasenstromsystems entschieden.

Die Jury hat von den gemachten Vorschlägen denjenigen herauszufinden gesucht, der die beste Garantie für sicheres Funktionieren bietet und der zugleich am ökonomischsten arbeitet. Ferner hat sie eine Anzahl ihrer Mitglieder beauftragt, die von den Bewerbern ausgeführten Anlagen, welche von ihnen als Referenzen angegeben waren, zu besichtigen.

Die Wichtigkeit der gleichzeitigen Abgabe von Licht und Kraft war in jener Zeit zwar zu begreifen; es sprach indessen alles dafür, in Chaux-de-Fonds für Licht und Kraft dasselbe Leitungsnetz zu benutzen; andererseits besass Locle bereits ein Leitungsnetz, welches durch eine bestehende Gleichstromcentrale gespeist wurde. Es war daher von Wichtigkeit, das neue Verteilungssystem dem alten gewissermassen aufzupfropfen.

Es war schliesslich empfehlenswert, sich für die Zukunft die Möglichkeit der Anwendung von Akkumulatoren zu sichern, um auch den Anforderungen bei dem niedrigsten Wasserstande genügen zu können.

Die Anwendung des Gleichstroms wurde durch vorstehende Betrachtungen begründet; sie wurde auch für das Sekundärnetz ohne weiteres angenommen; indessen lag hierdurch noch kein zwingender Grund vor, für die Anwendung des Thuryschen Systems konstanter Stromstärke für die Primäranlage, d. h. für die Kraftübertragung von der Primärstation in Combe-Garot nach den Unterstationen in Locle und Chaux-de-Fonds. Es schien in der That, als ob man diese Kraftübertragung ebenso leicht durch Dreiphasenstrom wie durch Gleichstrom ausführen könne.

Wenn sich nicht ein bemerkenswerter Vorzug in den geringeren Installationskosten des letzteren Systems ergeben hätte, wäre dasselbe auch sicherlich nicht zur Anwendung gelangt.

Das allergünstigste Drehstromprojekt sah die Inbetriebsetzung eines rotierenden Umformers von 300 PS vor, und dieser brachte dann einen Spannungsabfall von 6% in der Lichtleitung mit sich; mit dem Seriensystem dagegen war dieser Übelstand nicht verknüpft. Die einfache Leitungsführung bei dem Seriensystem und die überaus grosse Einfachheit bei der Inbetriebsetzung und beim Anhalten der Generatoren sowie Motoren bewogen die Jury, einstimmig die Ausführung des Projektes mit konstantem Strom anzunehmen, welches von der Gesellschaft für elektrische Industrie vorgeschlagen war.

### Beschreibung der Primärstation in Combe-Garot.

Die Wasserarbeiten begreifen in sich eine Thalsperre und einen Kanal, welcher das Flusswasser seitlich um einen Hügel herum bis zur Benutzung in der Station führt. Das so geschaffene Gefälle beträgt 91 m und die Rohrleitung ist so konstruiert, dass sie einem Verbrauche von 5 cbm Wasser in der Sekunde genügen kann, hingegen ist der normale Wasserverbrauch geringer; die durchschnittliche Entnahme beträgt 3000 l. In dem Programme der Bewerbung war bei dem niedrigsten Wasserstande ein Verbrauch von 1700 l als verfügbar angenommen. Die Wirklichkeit hat diese Voraussetzungen übertroffen.

Die Gemeinden Chaux-de-Fonds und Locle haben das Recht, bis zu 70% von der verfügbaren Wassermenge für sich zu beanspruchen, und der Rest gehört der Stadt Neuchatel.

Zwei starke Rohrleitungen aus Stahl von 1,1 m Durchmesser und 200 m Länge führen nach der Station, um zur Energieverteilung in Chaux-de-Fonds und Locle zu dienen. Der Dynamoraum ist eingerichtet für neun Maschinensätze, von denen bereits vier in Betrieb sind, während ein fünfter in der Montage begriffen ist.

Die verfügbare Wasserkraft gestattet, acht Maschinensätze gleichzeitig in Betrieb zu nehmen. Diese Maschinen gestatten, bei voller Belastung einen Strom von 150 Ampère, bei einer totalen Spannung von 14 400 Volt zu erzeugen, welcher einer aufgewendeten Leistung von 2600 PS entspricht.

Die Regulierung des Stromes geschieht durch die Variation der Tourenzahl, und aus diesem Grunde sind die Turbinen möglichst leicht konstruiert. Die Trägheit der in Bewegung befindlichen Massen ist ausserordentlich gering;

infolgedessen entsteht eine automatische Regulierung innerhalb gewisser Grenzen als Folge der geringen magnetischen Sättigung. Sobald nun der Strom dadurch wächst, dass irgendwo ein Motor ausgeschaltet wird, so wachsen die Verluste in den Generatoren und Motoren allmählich wie das Quadrat des Stromes; dadurch laufen die Turbinen von selber langsamer und leisten infolgedessen weniger Arbeit. Die Regulierung der Touren kann somit von Hand ausgeführt werden und besteht einzig und allein darin, dass der Zulauf zu den Turbinen mehr oder weniger geöffnet oder geschlossen wird, sodass auf diese Weise die Stromschwankungen einen mittleren normalen Wert nicht überschreiten.

Indessen ist noch ein automatischer Regulator in Anbetracht noch feinerer Regulierung angebracht worden. Dieser Apparat besteht aus einem Serienmotor, dessen Anker so gewickelt ist, dass er nicht mehr als $^1/_8$ Umdrehung macht. Normalerweise befindet sich indessen der Anker im Gleichgewicht, d. h. bewegungslos. Dieser Anker, dessen Lage sich in dem magnetischen Felde mit dem Strome ändert, wirkt direkt auf eine leichte Welle, die auf Kugeln gelagert ist, und diese Welle beeinflusst durch Hebelübersetzung die Reguliervorrichtung der Turbinen.

Die Generatoren sind sechspolig nach dem System Thury und haben einen Ankerdurchmesser von 1250 mm. Der Anker ist ein Trommelanker, und die Magnete tragen Hauptstromschaltung.

Diese Maschinen sind konstruiert für eine konstante Stromstärke von 150 Ampère und eine Spannung, welche hinaufregulierbar ist bis zu 1800 Volt und zwar durch Erhöhung der Geschwindigkeit bis auf 300 Touren. Bei 12 Touren ungefähr beginnen sie sich zu erregen und geben bei kurzgeschlossenem Stromkreise einen Strom von 150 Ampère ab.

Die Abnahmeversuche sind in Anbetracht des Isolationswiderstandes bei einer Spannung von 2700 Volt ausgeführt.

Jede Maschine besitzt ihr eigenes Schaltbrett, welches von der betreffenden Maschine aus beobachtet werden kann. Ein kleines Schaltbrett, welches ein Präcisionsvolt- und Ampèremeter trägt, gestattet dem Betriebsleiter, den Betrieb zu kontrollieren und statistische Aufzeichnungen zu machen.

Die Station ist gegen Blitzschäden durch Blitzableiter mit automatischer Lichtbogenunterbrechung geschützt, die an jeder Leitung vor der Einführung in das Gebäude angebracht sind und welche noch durch vier Induktionsspulen und zwei Kondensatoren in Gegeneinanderschaltung unterstützt werden.

Die Hauptstation in Combe-Garot wird durch drei Maschinenmeister überwacht, welche sich ungefähr alle acht Stunden ablösen.

## Die Leitungen.

Die Leitung ist in ihrem ganzen Verlaufe oberirdisch. In der Nähe der Centrale steigt die Leitung schnell aufwärts, um die Jurakette in der Höhe von 1350 m zu überschreiten, welche zwischen der Aar und Chaux-de-Fonds liegt. Auf eine Länge von 10 km von der Centrale an sind beide Leitungen an demselben Gestänge geführt. Die eine der beiden Leitungen führt von dort aus direkt nach Chaux-de-Fonds, passiert Locle und die Wasserscheide des Jura und schliesst dann den Kreislauf, indem sie zurückkehrt nach der Centrale.

Der Querschnitt der Leitungen beträgt 150 mm² und ihre totale L
52 km. Hierin sind die Anschlussleitungen zu den einzelnen Motoren
eingerechnet. Die Leitungen sind auf Doppelglocken aus Porzellan ve
welche in einem Abstande von 80 cm an den Stangen befestigt sind.

Die Hochspannungsleitungen in den Ortschaften sind ebenfalls alle
irdisch, aber ein allseitig geschlossenes Schutznetz schliesst die Leitu
ein, um alle Unfälle zu vermeiden, welche durch Leitungsbruch eint
könnten.

Die Anschlussleitungen zu den Motoren, welche direkt durch H
spannungsstrom gespeist werden, sind in vier lokalen Abzweigungen
geordnet, von denen sich zwei in Chaux-de-Fonds und zwei in Locle
finden. Jede Abzweigung kann durch einen ähnlichen Schalter, wie
jenigen an den Schalttafeln, kurzgeschlossen werden. Diese sind in ei
geschlossenen Kasten untergebracht.

Der Spannungsabfall in der Leitung beträgt 864 Volt; infolgedessen
trägt der Verlust bei halber Belastung 12 %; bei voller Belastung,
14 400 Volt mal 150 Ampères, reduziert er sich auf die Hälfte, näm
auf 6 %.

## Die Verwendung des Stromes.

Der grösste Teil des übertragenen hochgespannten Stromes wird
Chaux-de-Fonds und Locle direkt in die Motoren geleitet, welche zusam
2000 PS besitzen und ihrerseits die Niederspannungs-Dynamomaschinen
treiben, welche die Beleuchtung und den Betrieb der kleinen Motoren
einer Spannung von 150 und 300 Volt besorgen.

In Chaux-de-Fonds sind zwei Maschinensätze speziell für den Bet
der Trambahn aufgestellt und zur Speisung einiger grösserer Motoren
500 Volt Spannung. Ausser diesen Umformerstationen sind noch sieben
toren von zusammen 400 PS angeschlossen, die hier verschiedenen Indus
zweigen dienen.

Alle Motoren von mehr als 20 PS werden direkt durch den h
gespannten Primärstrom gespeist, während alle Motoren von gering
Leitung durch das sekundäre Beleuchtungsnetz von 150 oder 300 Volt
durch das Bahnnetz von 550 Volt gespeist werden.

## Umformerstation in Chaux-de-Fonds.

Die Umformerstation ist so erbaut worden, dass acht Maschinens
à 260 PS aufgestellt werden können.

Die Lichtverteilung geschieht durch ein Dreileitersystem. Zwei Maschi
sätze à 200 KW arbeiten mit 320 Volt auf die Aussenleiter. Zwei Ausgl
maschinen von 75 KW, die mit einem Motor von 120 PS gekuppelt
gleichen die Belastung beider Netzhälften aus; sie bestehen aus einem M
von 120 PS, welcher gekuppelt ist mit zwei Dynamomaschinen vo
160 Volt.

Die Wicklung der Generatoren für 320 Volt ist so ausgeführt,
diese Maschinen auch mit 550 Volt arbeiten können. Diese Anordnung
stattet, sie auch als Reservemaschinen für das Bahnnetz zu betrachten, e
so auch zur direkten Ladung der beiden Akkumulatorenbatterien für
Beleuchtung.

Die Verteilung geschieht mit 550 Volt durch zwei Maschinensätze à 200 KW und durch eine Pufferbatterie, deren Spannung durch eine Zusatzmaschine reguliert wird.

Als Wirkungsgrad eines Maschinensatzes von 300 PS war bei voller Belastung ein solcher von 82 % garantiert worden, und bei den Abnahmeversuchen wurde für je eine Dynamo und je einen Motor allein ein Wirkungsgrad von 93 % erreicht, welches dann als Gesamtwirkungsgrad 87 % ergiebt.

Die Benutzung der Elektromotoren als Triebkraft hat ganz beträchtlich zugenommen; sie hatte bereits 1898 die Voraussetzungen, welche man bei Aufstellung des Projektes gemacht hatte, erreicht und zwang zu einer Vergrösserung. Das sekundäre Netz speist gegenwärtig 120 Motoren von zusammen 250 PS, und ferner sind 3500 Glühlampen und 33 Bogenlampen angeschlossen.

Die Sekundärstation von Chaux-de-Fonds ist aus diesem Grunde im Jahre 1898 durch drei Akkumulatorenbatterien vergrössert worden.

Die Ladung der beiden Batterien, welche das Netz mit 300 Volt speisen, geschieht durch die gegenwärtigen Maschinen. Die Spannung derselben kann weit genug gesteigert werden. Arbeitet die Batterie dagegen als Pufferbatterie auf das Strombahnnetz, so wird sie geladen unter Zuhülfenahme eines Umformers, dessen Motor von dem Primärstrom gespeist wird und dessen Dynamomaschine als Zusatzdynamo bei der Ladung mit einer Spannung von 100 Volt und einer Stromstärke bis zu 400 Ampères benutzt wird.

Die Batterie, welche auf das Bahnnetz arbeitet, ist vollständig ohne jedes Zwischenglied in Parallelschaltung, arbeitet daher als Pufferbatterie und besteht aus 250 Zellen. Die Stromschwankungen sind durch den elektrischen Bahnbetrieb sehr stark, dagegen erfordert das Beleuchtungsnetz eine sehr konstante Spannung, und deswegen ist hier eine Zusatzmaschine eingeschaltet, welche dauernd mit der Batterie in Serie geschaltet ist und dadurch die Spannung derselben reguliert.

Dieselbe giebt während der Entladeperiode Strom in das Netz ab und ebenso auch während der Ladeperiode, falls die Netzspannung zeitweilig zu niedrig ist. Aus diesem Grunde wirkt ein Spannungsregulator auf die Zusatzmaschine, welcher gestattet, die Spannung von einem positiven Maximum bis zu einem negativen Maximum durch alle Zwischenstufen hindurch zu verändern.

Am Ende der Ladung ist die erforderliche Spannung $250 \times 2{,}6 = 650$ Volt, von denen 550 durch die Netzspannung und 100 durch die Zusatzmaschine geliefert werden. Am Ende der Entladung giebt die Batterie noch $250 \times 1{,}8 = 450$ Volt, und jetzt kommt ihr die Zusatzmaschine zu Hülfe und ergänzt die noch fehlenden 100 Volt.

Man kann auf diese Weise die Batterie mit einer Spannungsdifferenz von 200 Volt tüchtig laden, ohne dass sich die Netzspannung von 550 Volt entfernt; die für den Regulator erforderliche Zeit, um die Spannung um 200 Volt zu verändern, beträgt nur 15 Sekunden.

Der maximale Spannungsverlust, welcher in dem Netz in Chaux-de-Fonds auftritt, beträgt $5\frac{1}{2}$ Volt; dies ist also 1 %.

Der Zusatzmaschinensatz besteht aus einem 45 KW-Motor, welcher direkt einen Generator von 40 KW bei 550 Touren per Minute antreibt.

Die Schaffung einer Reserveanlage speziell für Chaux-de-Fonds wurde durch die schnelle und grosse Erweiterung des sekundären Netzes bedingt, um dadurch zu gewissen Jahreszeiten und speziell im Winter von zu niedrigem Wasserstande unabhängig zu sein.

Der Bauplatz für die neue Centrale ist nahe bei der Gasanstalt gewählt worden, weil hier Terrain verfügbar und leicht Gas sowie das nötige Brennmaterial herbeizuschaffen war.

Man konnte diese Centrale nach Belieben an das primäre oder an das sekundäre Netz anschliessen.

Da mehrere sehr wichtige grössere Motoren direkt an das Primärnetz angeschlossen waren, so war es besser, die Reservecentrale hier anzuschliessen, und überdies führte die Primärleitung in unmittelbarer Nähe der Gasanstalt vorüber, sodass die Anschlussleitung keine neuen Kosten verursachte.

Andererseits erschien es der grossen Verluste wegen sehr unvorteilhaft, die in der Reservecentrale erzeugte Energie erst noch zu transformieren, und ferner musste dann in beiden Centralen Bedienungspersonal sein.

Die schliesslich getroffene Lösung ist sehr vollkommen und genügt beiden Anforderungen in folgender Weise:

Jede Reservemaschine wird durch einen 250 PS-Gasmotor angetrieben und kann ohne Unterschied auf alle drei Netze arbeiten, sie kann nach Belieben 1150 Volt und 150 Ampère in das Primärnetz und 575 Volt und 300 Ampère in das Bahnnetz, sowie 320 Volt und 540 Ampère in das Beleuchtungsnetz abgeben.

Um dieses zu erreichen, war es nötig, alle Generatoren mit zwei verschiedenen Wicklungen zu versehen, welche man nach Belieben hintereinander oder parallel schalten kann. Ein zu diesem Zwecke konstruierter Umschalter gestattet, die Ankerwicklung auf das eine oder das andere der drei Netze zu schalten. Ein kleines Schaltbrett gestattet diese Schaltungen sehr einfach. Endlich gestattet es die vollständige Trennung von dem Sekundärnetz.

Die Stromregulierung geschieht auf zweierlei Weise:

1) die Maschine arbeitet als Nebenschlussmaschine mit konstanter Spannung und wird durch einen Rheostaten von Hand reguliert,

2) soll eine solche Maschine mit konstantem Strom laufen, so benutzt man eine besondere Erregerdynamo, welche stark genug ist, die Magnetwicklungen von vier Dynamos zu speisen. Ein besonderer Rheostat gestattet die Regulierung des Erregerstromes, und ein automatischer Regulator, welcher auf der Maschine selber angebracht ist, bewirkt die Konstanthaltung des Stromes.

Die Ingangsetzung der Gasmotoren vollzieht sich dadurch, dass die Generatoren als Motoren laufen; der hierzu erforderliche Strom wird durch das Netz von 550 Volt geliefert. Ist der Motor so in Gang gesetzt, so schaltet man die Maschine um und erhöht ihre Spannung bis zu der des einen oder des anderen Netzes.

Die Generatoren sind mit Hülfe von Raffard-Kupplungen direkt mit ihren Gasmotoren gekuppelt, ihre Tourenzahl beträgt 160 pro Minute.

Diese Centrale hat zur Zeit nur zwei Maschinensätze nötig und die folgenden werden nach Massgabe des Bedarfs aufgestellt werden. Vorgesehen sind acht Maschinensätze, welche zusammen 2000 PS entwickeln können.

In Locle ist bereits 1890 durch die Firma Cuénod Sautter & Co., welche Vorgängerin der Gesellschaft für elektrische Industrie ist, eine Centrale ausgeführt worden. Es wurde ein Dreileiternetz von zweimal 150 Volt ausgeführt, welches direkt durch das Wasserwerk an der Ranconniere gespeist wird. Dieses Werk ist ungefähr 3 km von dem Mittelpunkte des Verteilungsnetzes entfernt gelegen.

Die Entwickelung dieses Werkes hat einen sehr raschen Verlauf genommen; es war die erste städtische Centrale in der Schweiz, welche öffentlichen und privaten Zwecken diente. Da nun eine Reserve für diese Kraft erforderlich war, wandte sich die Ortsbehörde dieserhalb an die Gesellschaft von Chaux-de-Fonds.

Die Umformerstation von Locle bestand anfänglich nur aus einem Maschinensatz von 175 KW, und zwar aus einem Serienmotor, welcher zwei Generatoren à 165 Volt treibt; als nun aber die Entwickelung die gemachten Voraussetzungen noch überschritt, so musste man eine definitive Umformerstation schaffen, indem man seine Zuflucht zum Dampf nahm. Das Werk soll mit einem Wasserwerk zur Herbeischaffung von Trinkwasser verbunden werden, in welchem die Pumpen durch Serienmotoren angetrieben werden sollen.

Diese Station wird in ihrer vollständigen Ausführung enthalten:

1) für die Zeit der Trockenheit drei Sätze von Reservemaschinen, von denen jede eine vertikale Dampfmaschine, System Sulzer, à 250 PS bei 300 Touren per Minute und eine Dynamomaschine mit doppelter Wicklung, System Thury, enthält. Jede Dynamo soll direkt und ohne Unterschied entweder auf das Primärnetz mit 150 Ampère bei 1150 Volt oder auf das Sekundärnetz mit 540 Ampère bei 325 Volt arbeiten können. Die beiden Wicklungen sind hintereinander geschaltet, wenn die Maschine auf das Primärnetz arbeiten soll, und parallel, wenn sie auf das Sekundärnetz arbeiten soll,

2) zwei Umformer à 200 KW Leistung, bestehend aus je einem Serienmotor, System Thury, und je einem sekundären Generator von 600 Ampère bei 325 Volt,

3) drei Umformer à 175 KW, bestehend aus je einem 200 KW-Motor, welcher wiederum je zwei Sekundärgeneratoren antreibt.

Zur Ladung der Akkumulatoren sind zwei Sekundärgeneratoren vorgesehen, die zu diesem Zwecke mit der nötigen Spannungserhöhung arbeiten können; diese Maschinen sollen ebenfalls auf das projektierte Bahnnetz arbeiten.

Wenn die Generatoren das Primärnetz einzeln oder zu mehreren speisen werden, so wird die Regulierung auf konstanten Strom einfach dadurch erfolgen, dass man die Tourenzahl der Dampfmaschinen verändert.

Über diese Art der Regulierung hat sich ganz speziell bei dem Seriensystem eine sehr gute Ansicht herausgebildet; es macht jede Benutzung von Regulierapparaten überflüssig und gestattet dabei einen sehr ökonomischen Betrieb. Die Stromstärke wird thatsächlich ein für allemal nach der Dampfspannung einreguliert; diese ist in Anbetracht eines guten Betriebes und der Rentabilität gleich sehr hoch gewählt worden. Der Dampfverbrauch ist daher direkt der Tourenzahl der Dampfmaschine, d. h. der geleisteten Arbeit proportional. Die Regulierung durch die Dampfmaschine ist nicht nötig, sondern man begnügt sich, wenn die Dampfspannung innerhalb gewisser

Grenzen zu schwanken anfängt, die Erregung der Dynamomaschine dementsprechend zu verändern, wenn der Strom zu schwach ist. In dem ersteren Falle läuft die Dampfmaschine langsamer und der Primärstrom wird kleiner, in dem zweiten Falle ist es umgekehrt.

Es ist nötig, hierbei zu bemerken, dass diese Art der Regulierung während einiger Sekunden die entgegengesetzte Wirkung hat, wie diejenige, welche man erreichen will und die bei den Leitungsnetzen mit Lichtbetrieb nicht anwendbar ist. Da aber diese hier nur nach einer mechanischen Umformung der Energie gespeist werden und da ferner die Umformer mit genügend schweren Schwungrädern und den nötigen Reguliervorrichtungen versehen sind, so sind diese Veränderungen ohne irgend welchen Einfluss auf Beständigkeit der Sekundärspannung.

Die Gemeinden Chaux-de-Fonds und Locle untersuchten nun genau die Frage, wie der Betrieb des Wasserwerkes von Champ-du-Moulin mit demjenigen der elektrischen Centrale von Combe-Garot zu vereinigen ist, um dadurch eine verstärkte Kraft zu erhalten.

Man wird auf dem Wasserwerk einen neuen Maschinensatz aufstellen, welcher aus einer Turbine, einer Dynamo und einer Pumpe besteht und die so angeordnet sind, dass die Turbine die Pumpe ohne die Dynamo, oder die Dynamo ohne die Pumpe treiben kann, und dass die Dynamo als Motor arbeitet und so die Pumpe antreibt.

Während des Hauptverbrauches an elektrischer Energie, d. h. im Winter zwischen 4 und 8 Uhr abends und während niedrigen Wasserstandes werden die Maschinen von Champ-du-Moulin als Generatoren arbeiten und die Hauptleitung ebenso wie die Maschinen in Combe-Garrot speisen, sodass auf diese Weise selbst bei niedrigem Wasserstande die gesamte Leistung von zusammen 2400 PS aufgebracht wird.

Von 8 Uhr abends ab wird die für den elektrischen Betrieb verlangte Leistung kleiner und die Dynamomaschinen von Champ-du-Moulin werden alsdann von ihren Turbinen losgekuppelt, sodass sie dann durch den Strom von Compe-Garrot gespeist werden, also als Motoren laufen und so die Pumpen treiben. Man arbeitet alsdann für die Wasserversorgung mit einem Teil der verfügbaren Energie des Wasserwerkes von Compe-Garrot.

Wenn aus irgend einem Grunde die Centrale von Combe-Garrot ausser Betrieb gesetzt werden sollte, so wird in kurzer Zeit die Centrale von Champ-du-Moulin in Betrieb gesetzt, um den Dienst teilweise zu übernehmen, bis die Reservestationen betriebsfertig sind.

Aus vorstehender Beschreibung, die sich im wesentlichen an einen französischen Aufsatz der Cie. de l'Industrie Electrique anschliesst, ist ersichtlich mit welchem Aufwand von Geist und Thatkraft das Projekt gelöst worden ist. Es ist in der That aber, wie heute wohl alle Fachleute zugeben werden, eigentlich durch Drehstrom einfacher, billiger und betriebssicherer zu lösen.

II.

Interessant ist auch die Anlage, welche die Firma Brown, Boveri & Co, sich zur Schaffung der Betriebskraft für ihre Werkstätten in Baaden in der Schweiz errichtet hat.

## Beschreibung der Primärstation.

Zum Betrieb der Anlage wird eine Wasserkraft, der Limmat, $1^1/_2$ km unterhalb Baaden, ausgenützt. — Die Station ist auf dem linken Ufer erbaut und erhält ihre Wasserzufuhr durch einen circa 800 m langen und circa 14 m im Spiegel und 7 m in der Sohle breiten in das Flussbett eingebauten Kanal. Die Wassermenge beträgt im Mittel 18 cbm pro Sekunde bei einem mittleren Gefälle von 2,85 m, was einer verfügbaren Arbeit von circa 500 PS entspricht.

Diese 500 PS werden von drei horizontalen JONVAL-Turbinen der Firma ESCHER WISS & CIE. in Zürich, mit einer Leistung von je 170 bis 200 PS bei 40 Umdrehungen per Minute geliefert. Die Regulierung derselben wird von Hand bewirkt. Fig. 49 giebt eine Ansicht des Maschinensaales der Station.

Die Turbinen haben Oberwasserzapfen und tragen über denselben je ein grosses konisches Rad, durch welches die tieferliegenden Dynamowellen mit 200 Umdrehungen per Minute angetrieben werden. Der Antrieb der Erregermaschinen erfolgt durch zwei kleine, separate Erregerturbinen mit stehender Welle, auf welche die Erregermaschine direkt aufgesetzt ist.

## Elektrische Anlage.

Für die Verteilung der elektrischen Energie gelangte das Zweiphasenstromsystem mit getrennt geführter Licht- und Kraftleitung zur Verwendung und waren für die Wahl desselben folgende Gesichtspunkte massgebend.

Die Distanz vom Wasserwerk ist eine solche, dass mit Gleichstrom ohne Transformation nicht auszukommen ist. Infolgedessen wurde das Wechselstromsystem gewählt, und zwar, da ungefähr gleichviel Energie in Kraft und in Licht gebraucht wird, das sogenannte Zweiphasensystem. Dieses System bildet gegenüber dem gewöhnlichen Einphasenstrom den Vorteil, dass Motoren bequem betrieben werden können, die hauptsächlich, was das Anlaufen mit Kraft betrifft, Gleichstrommotoren vollkommen ebenbürtig sind. Gegenüber dem sogenannten Dreiphasensystem bietet das Gewählte den Vorteil, dass auch die Lichtabgabe eine rationelle ist und die Regulierung auf konstante Spannung gar keine Schwierigkeit bietet. Speziel erwähnenswert ist, dass Baaden wohl die erste Centrale ist, welche mit Zweiphasenstrom für Licht- und Kraftverteilung ausgeführt wurde. Der Erfolg dieser Anlage war ein so vollkommener, dass allein für die Schweiz für über 800 PS Anlagen in diesem System von der Firma ausgeführt und in Ausführung begriffen sind.

In der Station gelangten drei Dynamomaschinen (Fig. 49) von je $2 \times 100$ PS zur Aufstellung. Jede derselben besteht aus zwei elektrisch vollständig getrennten Hälften, welche nur Lager und Welle gemein haben und deren jede einen einphasigen Wechselstrom liefert.

Der Anker der einen Hälfte ist gegenüber dem in allen Teilen gleichgebauten Anker der anderen Hälfte um den halben Polwinkel vor- oder nacheilend aufgekeilt, sodass die beiden Wechselströme in ihren Phasen um eine viertel Periode verschoben sind und somit den gewünschten Zweiphasenstrom ergeben. Die feststehenden externen Magnetstellen der beiden Dynamo-

Fig. 49.

hälften sind ebenfalls getrennt und mit 24 Polen, entsprechend einer Cykelzahl von 40 per Sekunde ausgerüstet.

Von den seitlich angeordneten drei Erregermaschinen sind zwei direkt, wie bereits gesagt, durch kleine Turbinen, die andere durch einen hochgespannten Zweiphasenmotor angetrieben.

Die Leistung der grossen Maschinen beträgt je 2 × 60 Ampère bei 1100 Volt.

III.

Unter den in neuerer Zeit ausgeführten elektrischen Anlagen ist diejenige der Saline Lüneburg von besonderem Interesse, weil sie, wenn auch nur von geringer Ausdehnung, ein besonders gutes Beispiel für die Vorteile giebt, welche moderne elektrische Kraftübertragung gegenüber älteren mechanischen Übertragungen bietet und zudem in der einfachst denkbaren Form durchgeführt ist.

In dieser Saline wird seit alter Zeit Salz gewonnen, indem die aus einer unterirdischen Quelle hervorsprudelnde Soole verdampft wird. Ursprünglich wurde diese Soole einfach durch Menschen geschöpft, später wurde eine primitive Pumpe aufgestellt, welche zuerst durch ein Wasserrad, dann durch eine Dampfmaschine angetrieben wurde. Ausser der Hauptpumpe, welche die Soole förderte, waren noch einige kleinere Pumpen anzutreiben, welche Süsswasser schaffen, um zu verhindern, dass dieses der Soolquelle zufliesse und den Salzgehalt der letzteren verschlechtere. Die Pumpen liegen über ein grösseres Gebiet zerstreut; die Dampfcentrale wurde deshalb etwa in der Mitte dieses Gebietes aufgestellt und der Antrieb sämtlicher Pumpen erfolgte von hier aus teils durch hölzerne Gestänge, teils durch Drahtseile, alles in primitivster Weise. Da es sich hierbei zum Teil um die Überwindung nicht unbeträchtlicher Entfernungen handelte, traten naturgemäss bedeutende Verluste auf, die aber lange Jahre hindurch in Kauf genommen wurden.

Im Jahre 1894 wurde in Erwägung gezogen, die vorhandenen Einrichtungen durch neuere, rationeller wirkende zu ersetzen, und es lag in der Natur der Sache, dass hierfür die Elektricität gewählt wurde, bot sich doch hier mit gleichzeitig die Möglichkeit, eine bessere Beleuchtung der verschiedenen Siedehäuser und sonstigen Räumlichkeiten einzurichten.

Die Ausführung der Anlage wurde der Aktiengesellschaft Siemens & Halske übertragen und von dieser im Winter 1895/96 fertiggestellt. Es mögen hier einige Einzelheiten der Anlage beschrieben werden.

Fig. 50 giebt einen Lageplan, in welchem die Centrale durch $C$, die Hauptsoolepumpe durch $P$, die kleinen Wildwasserpumpen durch $p_1$, $p_2$ u. s. w., die Siedehäuser durch $S_g$, $S_2$ u. s. w. bezeichnet sind.

Die Anlage umfasst zwei Bogenlampen zu 9 Ampère, circa 500 Glühlampen zu 16 N.-K. und 11 Motoren. Von letzteren dient einer zu 9 PS zum Antrieb verschiedener Werkzeugmaschinen, ein ebensolcher zum Betrieb einer Centrifugalpumpe für das Gradierwerk, einer zu 8 bis 9 PS zum Antrieb der Soolepumpe, welche circa 350 cbm Soole in der Minute bei circa 35 m Gesamtförderhöhe fördert, 4 zu 0,3 PS und 2 zu 0,3 PS zum Betrieb der Wildwasserpumpen zur Förderung von durchschnittlich etwa 80 bezw. 20 l Wasser bei 13 m Förderhöhe, zwei kleine Motoren für den Betrieb von Schüttelsieben.

Für den Betrieb dieser Einrichtungen wurden zwei Maschinensysteme für eine Leistung von je 20 KW gewählt, welche so reichlich bemessen sind, dass in der Regel eines für den Betrieb vollständig genügt, sodass das zweite zur Reserve steht.

Als Dampferzeuger dienen zwei Cirkulationsröhrendampfkessel mit eingebautem Oberkessel von der Firma BREDA, BERLINER & Co., Gleiwitz. Die Kessel haben eine wasserberührte Röhrenheizfläche (also ohne Oberkessel) von je 48 qm und sind für einen Dampfüberdruck von 8 Atmosphären gebaut; die 43 Sioderöhren haben einen äusseren Durchmesser von 95 mm und eine Länge von 3500 m; der Oberkessel hat 800 mm Durchmesser, 4350 mm Länge und 9 mm Blechstärke. Der Rost hat eine Grösse von 1,2 qm, die Feuerung ist nahezu rauchlos. Die Kessel sind mit sämtlichen Armaturteilen ausgerüstet, gemeinschaftlich eingemauert und so aufgestellt, dass sie von

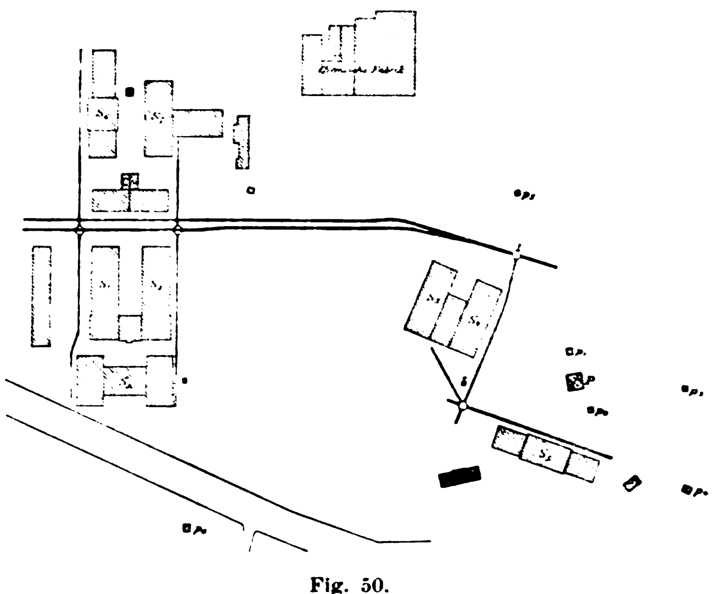


Fig. 50.

allen Seiten leicht zugänglich bleiben. Dampfspeisepumpe und Injektor liegen in nächster Nähe der Kessel. Die Dampferzeugung der Kessel beträgt normal 550, maximal 750 kg pro Stunde und Kessel.

Die Dampfmaschinen von der Firma MENCK & HAMBROCK, Altona, sind liegende eincylindrige Hochdruckdampfmaschinen mit Einspritzkondensation, von denen jede bei 8 Atmosphären Überdruck, bei 150 Umdrehungen in der Minute und bei circa 12 % Cylinderfüllung normal 30 und bei circa 15 % Füllung maximal 35 effektive PS leistet; der Cylinder hat 250 mm Durchmesser und 500 mm Hub. Der Dampfverbrauch beträgt 14 kg pro effektive PS und Stunde, also pro Maschine 490 kg maximal, sodass ein Kessel für eine ruhige und gleichmässige Dampfentwickelung genügt und vollkommen trockener Dampf erzeugt wird. Die Kondensation ist oberirdisch angenommen und erfolgt der Antrieb der Luftpumpe durch die verlängerte Kolbenstange. Da die Beschaffung des für die Kondensation nötigen Kühlwassers auf Schwierigkeit stiess, wurde ein selbstventilierendes Gradierwerk nach Patent KLEIN von der Firma KLEIN, SCHANZLIN & BECKER, Frankenthal,

aufgestellt, welches zur Rückkühlung einer Wassermenge von 25 bis 30 cbm genügt und einer Maschinenleistung von 75 effektive PS entspricht. Ferner wurde eine Filteranlage gleichfalls nach Patent KLEIN eingerichtet zur Reinigung von einem Teil des Luftpumpenwassers für Kesselspeisezwecke. Der Betrieb hierbei gestaltet sich so, dass eine Centrifugalpumpe das warm gewordene Kühlwasser aus dem Kondensator auf das Gradierwerk schafft. Nachdem es dieses durchlaufen und sich wieder abgekühlt hat, wird es durch die Luftpumpe wieder in den Kondensator gepumpt; ein Teil des warmen Wassers fliesst direkt in das erwähnte Filter, wird hier vom Öl gereinigt und wieder dem Kessel zugeführt.

Die Dynamomaschinen werden von den Dampfmaschinen mittels Riemen angetrieben. Sie sind von der durch die Firma SIEMENS & HALSKE zahlreich gebauten und bekannten *LH*-Type; ihre Leistung beträgt je 20 KW bei einer Spannung von 110 Volt und bei circa 850 Umdrehungen in der Minute.

Für die Stromverteilung dient eine Schalttafel aus Marmor, welche alle für einen geordneten Betrieb erforderlichen Apparate enthält. Von dem Schaltbrett gehen insgesamt 15 Stromkreise aus, und zwar 10 für Licht und 5 für Kraft.

Über die Beleuchtung erübrigen weitere Bemerkungen; erwähnt sei nur, dass die Frage, was für Leitungsmaterial in den Siede- und Trockenräumen, in welchen teils eine ausserordentlich hohe Temperatur, teils grosse Feuchtigkeit herrscht, zu verwenden wäre, eingehend geprüft wurde. Für die Trockenkammern erwies sich am zweckmässigsten die Wahl von Leitungen, welche nur eine Jutegarnumspinnung und darüber eine mit Isoliermasse getränkte Baumwollumklöppelung erhalten; für die Siederäume wurde durchweg beste Gummiisolation gewählt; zum Teil kamen auch Kabel zur Verwendung. Die Armaturen sind zum Teil wasserdicht und fast sämtlich mit Schutzkörben versehen. In den Lichtleitungen tritt überall nur ein geringer Spannungsverlust auf; nur in einem Kabel, welches nach dem ausserhalb des Salinengrundstückes gelegenen Direktionsgebäude in der Stadt führt, wurde ein Spannungsverlust von 10 Volt zugelassen, welcher mit Hülfe eines Hauptstromregulierwiderstandes konstant gehalten wird.

Die Kraftleitungen sind so bemessen, dass nicht mehr als 5 bis 10 % Verlust in ihnen auftreten. Sämtliche Motoren arbeiten mittels Riemenübertragung auf die von ihnen zu betreibenden Maschinen. In der Werkstatt ist eine grössere Transmission eingerichtet, welche von einem Motor angetrieben wird und von welcher aus die einzelnen Arbeitsmaschinen ihre Kraft erhalten. Die Pumpe ist von bekannter Konstruktion und leistet 25 bis 30 cbm Wasser in der Minute auf eine Förderhöhe von circa 7 m, wozu sie circa 7 bis 9 PS braucht.

Die Hauptbedeutung für den ganzen Betrieb haben naturgemäss die Sool- und Wildwasserpumpen. Sie sind sämtlich als Kolbenpumpen ausgeführt, deren Antrieb zunächst durch ein Gestänge erfolgt, welch' letzteres mit einem Excenter in Verbindung steht, der seinerseits durch Vermittelung eines Zwischenvorgeleges vom Motor mittels Riemen bethätigt wird. Die kleinen Pumpen sind eincylindrig ausgeführt. Für ihre Aufstellung wurden besondere kleine Häuschen errichtet, welche eine geschützte Aufstellung des Motors ermöglichten.

Über der Soolquelle stand schon ein eigenes Gebäude, in welchem die alten, einfach hölzernen Pumpen aufgestellt waren und von welchem aus die

Quelle selbst durch einen Schacht revidiert werden konnte. Es wurden jetzt zwei Pumpen mit je einem besonderen Motor aufgestellt, da es bei dieser wichtigen Einrichtung durchaus geboten war, für eine Reserve Sorge zu tragen. Die Anordnung ist ausserdem so getroffen, dass jede Pumpe von jedem der Motoren bethätigt werden kann. Die Konstruktion der Pumpen bot grosse Schwierigkeiten und konnte erst nach längeren Versuchen einwandsfrei durchgeführt werden. Sie sind einfach wirkende Dreicylinderpumpen von 110 mm Durchmesser, 250 mm Hub und schaffen bei circa 50 Umdrehungen in der Minute je 350 l Soole. Der Antrieb vom Motor geschieht mittels Riemenübersetzung auf eine Vorlegewelle und von da mittels zweier Riemen auf die Kurbelwelle, deren drei Kurbeln, unter 120 Grad stehend, mittels Pleuelstangen die Gestänge der Pumpen bewegen. Die Gewichte dieser Gestänge sind derart gewählt, dass beim Auf- und Niedergang des Pumpenplungers gleiche Arbeit geleistet wird. Die Pumpenplunger, Buchsen und Ventile sämtlicher Pumpen sind aus reiner Phosphorbronze gefertigt.

Die Anlage wurde Anfangs 1898 in Betrieb genommen, zunächst nur für Beleuchtung, während die einzelnen Motoren jeweils nach Fertigstellung der maschinellen Einrichtung angeschlossen wurden. Die Anlage arbeitet einwandsfrei zur grössten Befriedigung und mit gutem Erfolg in Bezug auf Ökonomie des Betriebes. In der That haben die bisherigen Versuche gezeigt, dass der Kohlenverbrauch für die ganze Anlage zur Zeit nur unwesentlich grösser ist, als früher, wo nur die Pumpen durch Dampfbetrieb bethätigt wurden, während jetzt circa 500 Lampen, wenn auch nicht alle gleichzeitig brennend, gespeist werden. Es fällt also die ganze Beleuchtung, welche früher durch Öllampen bewirkt wurde, nahezu umsonst ab, ein Ergebnis, wie es besser nicht gewünscht werden kann.

## IV.

Wir wenden uns nun zu einer neueren Drehstromanlage, welche infolge ihrer eigentümlichen Sekundärstation Interesse bietet. Es ist die elektrische Licht- und Kraftübertragungsanlage der

### Harzer Werke zu Rübeland.

Die Harzer Werke besitzen zu Rübeland zwei bis dahin nicht verwertete Wasserkräfte der Bode, welche zur Erzeugung von elektrischer Energie benutzt werden sollten, die einer oder zwei Sekundärstationen zuzuführen war, um hier Beleuchtungs- und Arbeitszwecken zu dienen. Eine Wasserkraft von circa 75 PS stand in Neuwerk zur Verfügung, eine andere etwa 40 PS repräsentierende in einer Entfernung von rund 1100 Meter von der ersteren in der sogenannten Achsenschmiede. Die Energie dieser beiden Wasserkräfte sollte nun zunächst nach einer Sekundärstation (Garkenholz), welche nahezu 1500 Meter von der Achsenschmiede entfernt liegt, übertragen und hier zur elektrischen Beleuchtung und zum Betriebe von Elektromotoren dienen.

Behufs Ausführung dieser Anlage hatten die Harzer Werke vier erste elektrotechnische Firmen zur Einreichung von Projekten aufgefordert, von welchen dann jenes der Elektricitäts-Aktiengesellschaft vorm. SCHUCKERT & Co. in Nürnberg zur thatsächlichen Ausführung gewählt wurde.

Die ganze Anlage umfasst zwei Primär- und zunächst eine Sekundärstation, eine zweite ist noch in Aussicht genommen; in den beiden Primärstationen, welche in Parallelschaltung arbeiten, wird dreiphasiger Wechselstrom mit einer Betriebsspannung von 2000 Volt erzeugt und dieser nach der Sekundärstation geleitet, wo er direkt einem Drehstrommotor zugeführt wird, welcher zum Betriebe einer Gleichstromdynamomaschine dient. Es soll nun hier zunächst diese in mancher Beziehung Neues zeigende Anlage, welche typisch für viele andere werden dürfte, etwas eingehender beschrieben und dann einige der Versuche mitgeteilt werden, welche gelegentlich der Abnahme der Anlage vorgenommen wurden.

Zur Aufstellung kam je eine GIRARD-Turbine, welche mittels Riemen die Dynamomaschinen treiben. Die Turbine in der Station Neuwerk ist für ein Gefälle von 7,0 m und für ein Wasserquantum von 2000 Liter per Sekunde konstruiert, die in der Achsenschmiede für ein Gefälle von 4,2 m und für ein sekundliches Wasserquantum von 1500 Liter. Die Anordnung dieser Turbinen ist aus den Figg. 2a und 3 zu entnehmen. Zur Regulierung des Aufschlagwassers sind die Leitradkränze mit Ringschieber versehen, die Regulierung erfolgt vom Maschinenraum aus. Eine schmiedeeiserne Haube nebst Zuführungsrohr dienen zur Leitung des Wassers auf die Turbine. Die Turbinen arbeiten auf ein Vorgelege, von welchem der Antrieb der Dynamomaschinen erfolgt.

In der Primärstation Neuwerk dient zur Stromerzeugung eine SCHUCKERTsche Drehstromdynamo, Modell *WJd* 40 für 100 Polwechsel und $\sqrt{3} \times 11,5$ Ampère bei 2000 Volt, welche 40000 Watt bei 750 Umdrehungen pro Minute bei einem Kraftbedarf von 30 PS leistet.

Die Maschine ist achtpolig, gehört der bekannten Induktionstype an mit rotierender Erregerwicklung und feststehendem Anker. Die Maschine liefert drei Wechselströme mit einer Phasenverschiebung von je 1/3 Periode, diese Ströme werden aus feststehenden Klemmen abgeleitet, zwischen welchen eine Spannungsdifferenz von 2000 Volt besteht. Zur Erregung des rotierenden Elektromagneten dient eine Gleichstrommaschine Mod. *AF* I mit Verbundwicklung für 85 Volt und 15 Ampère bei 1410 minutlichen Umdrehungen und 1,8 PS Kraftbedarf. Der Antrieb dieser Maschine erfolgt gleichfalls mittels Riemen von dem Turbinenvorgelege aus. Der von der Maschine erzeugte Dreiphasenstrom wird zunächst einer Schalttafel aus Marmor zugeführt, von wo aus er dann in die Fernleitung übertritt. Die Anordnung sämtlicher Apparate ist ausserordentlich übersichtlich und so zweckmässig, dass ihre Handhabung eine möglichst einfache ist, und dadurch eine hohe Betriebssicherheit gewährt wird. Alle jene Teile der Leitungen, welche unter hoher Spannung stehen, sind so angeordnet, dass eine zufällige Berührung derselben ausgeschlossen erscheint. Jede Hochspannungsleitung enthält eine Abschmelzsicherung der bekannten SCHUCKERTschen Konstruktion, welche den an solche Sicherungen zu stellenden Anforderungen bestens entspricht. Zur Messung der Stromstärke dient ein Hitzdrahtampèremeter von HARTMANN & BRAUN, die Spannungsmessung erfolgt an einem mit einem Messtransformator verbundenen SCHUCKERTschen Voltmesser. Besondere Erwähnung verdienen die Minimalstromausschalter, durch welche bei einem Bruch der Hochspannungsleitung diese stromlos wird, indem dann der Erregerstrom selbstthätig unterbrochen und so die Strom liefernde Maschine selbst stromlos wird. Die prinzipielle Einrichtung und Wirkung dieser

Minimalstromrelais ist folgende: In jede der drei Leitungen ist ein Elektromagnet eingeschaltet, dessen Anker ein um eine Achse drehbares Aluminiumsegment ist, welches infolge der Induktionswirkung so lange in der gezeichneten Lage erhalten wird, als Wechselstrom durch die Spule fliesst. Wird nun aus irgend einem Grunde eine Leitung stromlos etwa durch Reissen oder Brechen des Drahtes, so tritt der in der betreffenden Leitung befindliche Minimalausschalter in Aktion, der Aluminiumanker fällt zurück und stellt dadurch einen Kontakt bei *a* her, dadurch wird der in den Erregerstromkreis geschaltete automatische Magnetausschalter bethätigt, was zur Folge hat, dass die Erregerwicklung *M* der Drehstrommaschine aus dem Erregerstromkreise ausgeschaltet und dafür ein Ersatzwiderstand *R* eingeschaltet wird. Die Drehstrommaschine und die Hochspannungsleitungen werden dadurch stromlos und auf diese Weise allen Gefahren, welche ein Drahtbruch mit sich bringen könnte, vorgebeugt. Um die Beschreibung der Schaltbretteinrichtung zu vervollständigen, mag noch erwähnt werden, dass in dem Erregerstromkreise auch ein Regulierwiderstand ist, sodass mit diesem mit dem Nebenschlussregulator die Erregung innerhalb ziemlich weiter Grenzen variiert und reguliert werden kann. Jede der drei Hauptleitungen ist zum Schutze der Maschinen gegen atmosphärische Entladungen mit einer Blitzschutzvorrichtung versehen, bei welcher durch eine elektromechanische Wirkung die Entstehung eines dauernden Lichtbogens verhindert wird.

Von dem Schaltbrett führt die Fernleitung nach der zweiten Primärstation, der Achsenschmiede. Die Freileitung ist hergestellt aus drei hartgezogenen Kupferdrähten von 3 mm Durchmesser. Die Leitung ist längs der Bode geführt und an Masten mittels Doppelmantelisolatorenglocken befestigt. Um eine Induktionswirkung dieser Leitungen auf die von denselben Masten getragene Fernsprechleitung zu verhindern, ist bei ersteren von einer besonderen Schleifenführung Gebrauch gemacht worden.

Eine analoge Einrichtung besitzt die zweite Primärstation Achsenschmiede. In dieser ist eine Drehstromdynamo Modell ***WAd*** 15 für 100 Polwechsel $\sqrt{3} \times 4.5$ Ampère bei 1950 Volt und einer Leistung von 15000 Watt aufgestellt. Der Kraftbedarf dieser Maschine soll 24 PS betragen, die Umdrehungszahl 1000. Die Maschine gehört dem Aussenpoltypus an, mit rotierendem Anker, die Hochspannungsströme werden an drei auf der Achse sitzenden Schleifringen abgenommen. Zur Erregung der feststehenden Magnete dient eine Gleichstrommaschine desselben Modells wie in der ersten Station. Die Schaltbretteinrichtungen der früheren Station finden wir auch hier wieder, ausserdem sind aber noch die Vorrichtungen zum Parallelschalten der Maschinen, nämlich ein Synchronismusanzeiger in Verbindung mit zwei Messtransformatoren und zwei Spannungsmessern nebst Phasenlampe und einem dazu gehörigen zweipoligen Umschalter für vier Stromkreise. Die Einrichtungen für die noch zu führende Leitung nach einer zweiten zu errichtenden Sekundärstation Rübeland sollen erst später ausgeführt werden.

Die Einrichtung ist so getroffen, dass auf dieser Station sowohl die Parallelschaltung der beiden Primärmaschinen als auch die Einschaltung des auf der Sekundärstation aufgestellten synchronen Drehstrommotors erfolgen kann. Bei einer solchen Parallelschaltung müssen bekanntlich vorausgesetzt, dass die Mehrphasenstrommaschinen so an die Sammelschienen angeschlossen

sind, dass die Drehfelder der Maschinen ein und dieselbe Drehrichtung haben, folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein: die zuzuschaltende Maschine muss im Augenblicke des Zuschaltens dieselbe Spannung haben, mit derselben Polwechselzahl laufen und die gleiche Phasenstellung haben wie die bereits im Betrieb befindliche Maschine. Zur Kontrolle der ersten Bedingung dienen zwei Voltmeter, von denen das eine die Spannung an den Sammelschienen, das andere die Spannung der zuzuschaltenden Maschine angiebt. Die zweite Bedingung wird erfüllt durch Regulierung des Antriebmotors also hier der Turbine. Die dritte Bedingung wird festgestellt durch einen Synchronismuszeiger oder Synchronometer. Dieser wird gebildet durch ein Voltmeter, zu welchem eine Glühlampe (Phasenlampe) parallel geschaltet ist. Dieses Voltmeter ist verbunden mit den Messtransformatoren; der Zeiger des Voltmeters schwingt so lange hin und her, als die Phasen der Maschinen voneinander abweichen. Je mehr sich die Phasen nähern, was durch vorsichtige Regulierung der Umdrehungszahl des Antriebsmotors erreicht wird, desto ruhiger und langsamer wandert der Zeiger über die Skala. Unter fortwährender Vergleichung der beiden Maschinenvoltmeter ist mit dem Parallelschalten so lange zu warten, bis der Zeiger des Synchronometers langsam auf die Marke kommt, welche für den erreichten Synchronismus gültig ist. Die zu dem Synchronismuszeiger parallel geschaltete Glühlampe zeigt entsprechend den Schwingungen desselben ein periodisches Glühen und Verlöschen. Sobald der Synchronismus erreicht ist, der Zeiger sich also auf die Synchronmarke eingestellt hat, zeigt die Glühlampe ihre grösste Helligkeit. In diesem Augenblicke ist der Schalter der zuzuschaltenden Maschine zu schliessen. Um die zugeschaltete Maschine zur Stromlieferung heranzuziehen, muss die Kraftzufuhr für diese erhöht werden und in demselben Masse die Kraftzufuhr für die im Betrieb befindliche Maschine herabgemindert werden, bis die parallel laufenden Maschinen sich nahezu gleichmässig in die Stromlieferung teilen. Eine solche Parallelschaltung erfordert nur kurze Zeit und vollzieht sich vollständig sicher und anstandslos. Auch hier sind wieder Minimalstromunterbrecher gleicher Einrichtung wie auf der ersten Station vorhanden.

Die Hochspannungsleitung führt von dieser Station nach der Sekundärstation Garkenholz und besteht wieder aus drei hartgezogenen Kupferdrähten von 3 mm Durchmesser.

Aufgestellt ist hier ein Drehstromsynchronmotor, Modell *WJd* 30, für eine Leistung von 35 PS und 750 Umdrehungen bei einem elektrischen Energiebedarf von 29 000 Watt bei 1920 Volt. Dieser Motor treibt mittels Riemen eine Gleichstromdynamomaschine Modell *AF* 21 mit Nebenschlusswicklung für eine Leistung von 21 000 Watt bei 33 PS Kraftbedarf. Ferner befindet sich hier eine Akkumulatorenbatterie, geliefert von der Akkumulatorenfabrik in Hagen, bestehend aus 48 Elementen der Type *E* 13 und 12 Elementen der Type *E* 23 mit einer Kapazität von 384/510 bezw. 540/725 Ampèrestunden und · 128/52 bezw. 180/72 Ampère Entladestrom bei drei- bezw. zehnstündiger Entladung; die Ladestromstärke ist 128 bezw. 180 Ampère.

In sehr übersichtlicher Anordnung enthält die in dieser Station befindliche Schalttafel aus Marmor die sonstigen zum Betriebe erforderlichen Einrichtungen und Apparate. Zunächst einen in die Erregerwicklung des Drehstrommotors geschalteten Regulierwiderstand, Strom- und Spannungsmesser,

Stromrichtungsanzeiger, einen automatischen Schwachstromausschalter für 200 Ampère, einen Doppelzellenschalter für 20 Zellen mit automatischem Antrieb, einen Nebenschlussregulator für die Gleichstrommaschine, dann verschiedene Ausschalter, Sicherungen und Strommesser für die Gleichstrommotoren. Ein Anlasswiderstand für die Gleichstrommaschine, wenn diese als Motor zum Anlassen des Synchronmotors dient, befindet sich ebenfalls auf der Schalttafel angebracht.

Ausser zur Lichtlieferung dient der elektrische Strom noch zum Betriebe von Elektromotoren und zwar wird einer zum Antriebe der Förderschale benutzt, dieser Motor (Modell *AF* 10) hat eine Leistung von 12 PS, ein anderer Elektromotor (*AF* 3) für eine Leistung von 4,3 PS treibt eine Pumpe, ein dritter Motor für die Schmiede und Kalkmühle besitzt eine Leistung von 2,8 PS. Die Einrichtung ist so getroffen, dass das sekundäre Gleichstromnetz entweder durch die Gleichstrommaschine, oder durch die Akkumulatoren oder auch durch beide zugleich mit Strom versorgt werden kann.

Beim Anlassen des Drehstrommotors dient die Gleichstrommaschine als Motor, der durch den Akkumulatorenstrom getrieben wird. Der Anschluss des Drehstrommotors an die Primärleitung erfolgt auf der Station Achsenschmiede unter Beachtung derselben Umstände, wie sie vorher bei der Parallelschaltung der Primärmaschinen beschrieben wurden, er läuft dann synchron mit der Primärmaschine und treibt bei entsprechender Regulierung die Gleichstrommaschine an, die zur stromgebenden Maschine wird. Auch diese Inbetriebsetzung des Drehstrommotors erfordert wenig Zeit und vollzieht sich in einfachster Weise.

Die Fernleitungen sind jede am Anfang und Ende durch in jeden Pol eingeschaltete Hochspannungsblitzableiter geschützt, bei den Strassenübergängen sind unterhalb der Fernleitungen Fangnetze angebracht, die ein Herabfallen des Drahtes bei etwaigem Bruch ausschliessen, die Minimalstromausschalter machen überdies in einem solchen Falle, wie schon erwähnt, die ganze Leitung stromlos, sodass auf diese Weise alles geschehen ist, um jede besondere Gefährlichkeit der Anlage zu vermeiden. Sämtliche Stationen sind durch Telephone miteinander verbunden, sodass eine Verständigung zwischen denselben in leichtester Weise möglich ist, eine Induktionswirkung der Fernsprechleitung ist durch Kreuzen der Starkstromleitung vollständig vermieden. Der gesamte Betrieb wird von der Station Achsenschmiede aus geleitet und daselbst das Aus- und Ein-, sowie Parallelschalten der Motoren und Primärmaschinen vorgenommen.

Die ganze Anlage, die anstandslos funktioniert, zeigt in allen ihren Teilen eine sehr sorgfältige und gediegene Ausführung und bietet dadurch volle Gewähr für einen sicheren und gefahrlosen Betrieb. Sie liefert ein interessantes Beispiel einer Energieumsetzung und Übertragung auf grössere Entfernungen und zeigt uns wieder, in wie einfacher Weise disponible Wasserkräfte, die an Ort und Stelle nicht verwendet werden können, doch in einiger Entfernung verwertet und der Industrie dienstbar gemacht werden können.

## V.

Weniger durch Besonderheiten in der Ausführung der Anlage, als vielmehr dadurch, dass die Forderung erfüllt werden musste, ein bestehendes Fabriketablissement grosser Ausdehnung mit elektrischem Gruppenbetriebe

zu versehen, verdient einige Aufmerksamkeit, die Kraftverteilungsanlage, welche die Firma Brown, Boveri & Co. in der Spinnerei der Aktiengesellschaft „La Louisiane“ in Gent, Belgien, ausgeführt hat.

Die einzelnen Werkstätten dieser Gesellschaft „La Louisiane“ sind nacheinander entstanden und daher wie üblich auch eine jede nacheinander mit kleinen unrationell arbeitenden Dampfmaschinen in Betrieb genommen worden.

Die Aufgabe, ein solches Werk mit seinen bestehenden Transmissionsanlagen für eine Drehstromkraftverteilung ohne Betriebsstörung umzubauen, ist wesentlich schwieriger, als die Errichtung einer ganz neuen Anlage.

Es ist daher weniger die elektrische Ausführung, als vielmehr die mannigfache Vermeidung örtlicher Schwierigkeiten, welche bei dieser Anlage anziehend und lehrreich ist, und es dürfte daher das Studium der kleinen Schrift, in welcher die Firma Brown, Boveri & Co. die Beschreibung dieser Anlage niedergelegt hat, zu empfehlen sein. Dieser Bericht findet sich im Journal „Le Genie Civile“, Paris 1900.

Beiläufig bemerkt enthält die Anlage eine ausserordentliche Drehstromkraftverteilung für etwa 350 sekundäre Pferdestärken, darunter Elektromotoren bis zu 70 effektiven PS.

Getrennt davon ist die Beleuchtungsanlage, welche mit Gleichstrom betrieben und durch zwei Dynamomaschinen von zusammen 120 KW gespeist wird.

Interessant sind bei dieser Anlage beziehungsweise in der angeführten Beschreibung die Angaben über die Zweckmässigkeit des aufgewandten Gruppenbetriebes, welcher ersichtlich in dieser Anlage zweckmässiger, als der Einzelbetrieb sich herausgestellt hat.

Wir wollen auch dieses Kapitel nicht verlassen, ohne

## VI.

## Die Kraftanlage an den Niagarafällen

zu erwähnen und mit einigen Worten zu erklären.

Bereits im vorigen Jahrhundert tauchte der Gedanke auf, die gewaltigen Kräfte, welche die Fälle des Niagara vermöge ihrer grossen Wassermengen verbunden mit einem ganz erheblichen Gefälle besitzen, der Menschheit nutzbar zu machen. Indessen befand sich zu jener Zeit die Ingenieurwissenschaft noch nicht in der Lage, aus ihren mannigfachen Spezialfächern die Kraft zu sammeln, um ein solches Projekt durchzuführen; naturgemäss dachte man sich damals die Verwertung der Niagarafälle nur in Gestalt einer bescheidenen Wasserräderanlage. Zudem wurde kurze Zeit darauf die Dampfmaschine erfunden, reichhaltige und billige Kohlenlager erschlossen; die Folge davon war, dass mehr und mehr die Möglichkeit einer Ausnutzung der Niagarafälle zu schwinden schien, da die Natur diese grossartige Schöpfung ausserdem an einem ziemlich entlegenen Punkte der neuen Welt ins Leben gerufen hatte. Dennoch wurde schon im Jahre 1861, nachdem die dortige Gegend mehr und mehr bevölkert worden war, eine Anlage geschaffen in Gestalt eines Kanals, der vom oberen Niagara abzweigend mit ziemlich starkem Gefälle eine grosse Anzahl Mühlen und andere industrielle Etablissements mit Kraft versorgte. Diese rein hydraulische Anlage war bis zum Jahre 1885 derart ausgedehnt worden, dass sie ungefähr 16000 Pferdekräfte

lieferte. In diesem Jahre thaten sich eine Anzahl Anwohner der Fälle, welche an einer weiteren Vergrösserung der Anlage interessiert waren, zusammen und erwirkten vom Staate New-York, innerhalb dessen Grenzen die Fälle liegen, eine Reihe von Konzessionen betreffend den Ausbau einer grossen Kraftanlage an dem Niagarafluss. Nach Gewinnung der nötigen Kapitalien wurde im Jahre 1889 die Cataract Construction Company gebildet von einer Reihe der hervorragendsten Finanzleute und Industriellen der Vereinigten Staaten. Die Gesellschaft ernannte zunächst als beratende Ingenieure die Herren Dr. Sellers und C. Herschel; von diesen beiden Männern rührt der in seinen Grundzügen allerdings schon von dem Ingenieur Evershed aufgestellte Generalanschlag beziehungsweise der hydraulischen Anlage her. Oberhalb der Fälle sollte am rechten Niagaraufer ein Kanal abgezweigt werden, genügend um dem Bette des Niagara eine Wassermenge zu entziehen, welche für 100000 Pferdekräfte ausreichen sollte. Am Ende dieses Kanals war die Turbinenstation projektiert; deren Turbinenräder sich circa 50 m unter dem Oberwasserspiegel befinden sollten; das also mit 50 m Gefälle hier herunterstürzende Wasserquantum sollte ein langer Unterwassertunnel nach dem in gerader Linie nächsterreichbaren Punkte unterhalb der Fälle befördern. Nach diesem allgemeinen Anschlag wurde auch thatsächlich die hydraulische Anlage ausgeführt, über 1000 Menschen waren allein am Bau des Tunnels länger als drei Jahre hindurch beschäftigt, da derselbe durchweg durch Felsen gesprengt werden musste; desgleichen waren die übrigen Arbeiten ausserordentlich schwierige.

Weiter als bis auf die soeben angedeuteten Grundzüge des hydraulischen Teiles der Anlage erstreckte sich der Generalanschlag der Herren Sellers und Herschel nicht; die spezielle Projektierung der Turbinen, sowie die Wahl des Systems, nach welchem die gewonnene Kraft der Turbinenachsen in näherer und weiterer Umgebung verteilt werden sollte, wurde in die Hände einer Kommission gelegt, welche sich unter der Bezeichnung International Niagara Falls Commission in London konstituierte und aus fünf hervorragenden Männern der Wissenschaft und Technik bestand. Präsident dieser Kommission, welche vornehmlich auch Preisausschreiben betreffend der Kraftverteilungsanlage und des Turbinensystems zu veranstalten hatte, war Sir William Thomson, der jetzige Lord Kelvin.

Behufs Erzielung eines geregelten Wasserzuflusses hat man circa $2^1/_2$ km oberhalb des amerikanischen Falles — genügend weit von der Stadt entfernt, um dem pittoresken landschaftlichen Bilde keinen Eintrag zu thun — vom Niagara einen Kanal von circa 500 m Länge, 63 m Breite und 4 m Tiefe abgezweigt, dessen Bett im festen Gestein ausgehauen werden musste. Die Böschungen desselben sind mit grossen Steinblöcken ausgekleidet und mit zahlreichen Öffnungen versehen, um etwaigen später zu errichtenden Etablissements die Wasserzufuhr möglichst zu erleichtern. Am Ende des Kanals an der nördlichen Seite desselben befindet sich der Radschacht für die grosse Anlage mit einer Tiefe von 60 m, einer Breite von 7 m und einer Länge von 47 m, welcher im Felsgestein eingeschlagen werden musste und dessen Wände mit schweren Mauersteinen verkleidet wurden. Besondere Festigkeit erhielt dieses Mauerwerk am oberen Teile des Schachtes, welcher die Bogen für die Lager der Dynamos zu tragen hat. Der Radschacht ist im Stande, drei Turbinenanlagen von der Grösse, wie sie jetzt ausgewählt wurden, nämlich fünf Stück à 5000 PS, aufzunehmen; sollte jedoch die erzeugte

Energie dem thatsächlichen Bedarf nicht mehr genügen, so kann man den Schacht bis zu einer Länge von 87 m erweitern, welcher dann den erforderlichen Raum zur Aufstellung von Turbinen gewähren würde.

Im letzteren Falle würde erst die Hälfte der zur Verfügung stehenden Wasserkräfte ausgenutzt werden. Das Wasser des Kanals wird mittels eines Tunnels von circa 2233 m Länge, 7 m Höhe und 6,3 m Breite dem Niagara unterhalb der Wasserfälle wieder zugeführt, und zwar mündet derselbe in nächster Nähe der bekannten Hängebrücke über den Fluss. Von dem Fusse des Radschachtes wird das abfliessende Wasser mittels eines kurzen Tunnels nach dem Haupttunnel geleitet. Die Wände des letzteren bestehen in der Hauptsache aus vier Bogen Ziegelmauerwerk. Das Gefälle des Tunnels beträgt 4—4:1000 Fuss (englisch) und die Geschwindigkeit des fliessenden Wasser circa 9 m pro Sekunde, **sodass nach vorgenommenen Berechnungen circa 100000 bis 150000 PS nutzbar gemacht werden können.**

Über dem oben erwähnten Radschacht ist das Gebäude für die Kraftstation aus Granitsteinen errichtet worden; zum Heben der erforderlichen Lasten wurde ein elektrisch betriebener Krahn mit einer Leistung von 50 tns. benutzt. Ein massiver gewölbter Viadukt aus behauenen Steinen ist an der Kraftstation quer über den Kanal gebaut worden, um die Hochspannungsleistungen nach der auf dem jenseitigen Ufer befindlichen Transformatorenstation zu überführen.

Von den Öffnungen an den Seiten des Kanals, welche dem Gebäude des Maschinenhauses entlang angebracht sind, wird das Wasser mittels stählerner Schützen mit einem Durchmesser von 2,5 m nach den zu je zwei angeordneten Turbinen geleitet. Dieselben wurden von der Firma J. P. Morris & Co., Philadelphia nach Entwürfen der Herren Faesch und Piccard, Genf, gebaut. Jedes Paar dieser Wasserräder ist für eine Maximalleistung von 5000 PS bestimmt. Die Turbinen liegen zu je zwei übereinander, der Wassereintritt erfolgt zwischen beiden. Die Turbinen besitzen einen Durchmesser von 1,7 m, die Schaufeln bestehen aus drei voneinander getrennten Teilen, um eine möglichst grosse Leistung zu erzielen. Das horizontal liegende Leitrad besitzt 36, das Laufrad 32 Schaufeln, und ein Regulator regelt den Wasserzufluss. Die durchschnittliche Tourenzahl beträgt 250 in der Minute. Die Fallhöhe von der Oberfläche des Wassers im Kanal bis zu dem Punkt zwischen den beiden Rädern, an welchem das Wasser eintritt, beträgt circa 50 m.

Wir wollen nunmehr unserem eigentlichen Thema näher treten, der elektrischen Anlage sowohl was Stromerzeugung als auch Stromverteilung betrifft. Die Cataract Construction Company und die von ihr ernannte Prüfungskommission ist sehr vorsichtig bei Auswahl des Verteilungssystems zu Werke gegangen; in der alten und neuen Welt wurden in einem Zeitraum von drei Jahren von den Ingenieuren und Bevollmächtigten der Gesellschaft alle grösseren Kraftverteilungsanlagen besichtigt und ihre ökonomischen Resultate geprüft. In ernste Erwägung musste man nach dem Jahre 1890 drei Methoden ziehen, nämlich 1. Druckwasser, 2. Druckluft, 3. Elektrizität. Was nun die Druckwasseranlage betrifft, so scheint das Beispiel Genfs auf das amerikanische Konsortium von grossem Einfluss gewesen zu sein. Es trat bei Inspektion der grossen Druckwassercentrale in genannter Stadt die Thatsache unbestreitbar zu Tage, dass die Anlage keine genügende Rentabilität besass, vielmehr rentabler mit Elektrizität ausgeführt worden wäre;

bekanntlich hat man sich in Genf dies auch zur Lehre genommen und bei Vergrösserung des Werkes dasselbe mit elektrischer Kraftverteilung ausgestattet. Das Druckluftsystem scheint sehr viele Anhänger gehabt zu haben; die Resultate des Poppschen Werkes in Paris haben viel dazu beigetragen, die Idee einer Wasserkraft-Druckluftcentrale an den Niagarafällen als rentabel erscheinen zu lassen. Schliesslich fiel die Wahl doch auf das in diesem Falle allein angebrachte System der elektrischen Kraftverteilung, welche das ermöglichte, was keine der anderen Methoden auch nur annähernd versprechen konnte, nämlich die Kraft der Turbinenstation bis auf hunderte von Kilometern fortzuleiten und sie dort zu einem Preise zu verkaufen, der noch bedeutend unter den Betriebskosten der besten heutigen Dampfmaschine bleibt.

Die Männer, welche im Vordergrunde bei den nun folgenden Beratungen über die Wahl des geeigneten elektrischen Systems standen, waren Professor Rowland und Professor Forbes; ihnen stand als maschinentechnischer Beirat Professor Sellers zur Seite. Als Resultat der Besprechungen und Studien dieser Männer wurde das System des zweiphasigen Wechselstroms angenommen, welches von Nicola Tesla erfunden war und von der Westinghouse Company in Pittsburg ausgebeutet wird. Entsprechend den 5000 PS Doppelturbinen wurden zwölfpolige Dynamomaschinen von 250 Touren per Minute gewählt, welche direkt gekuppelt werden sollten mit den Triebachsen der Turbinen. Dass Wechselstrom und nicht Gleichstrom anzuwenden war, dürfte genügend klar werden durch die Überlegung, dass weite Entfernungen bei der Stromübertragung, deshalb also auch sehr hohe Spannungen in Betracht kamen.

Die Wahl der Betriebsspannung wurde dadurch bestimmt, dass die Energie des Stroms sowohl in nächster Nähe als auch bis zu einer Mindestentfernung von 32 km zu verteilen war. Man entschied sich deshalb für eine verhältnismässig geringe Spannung an den Maschinen von 2400 Volt pro Phase und nahm für die Fernleitungen nach Buffalo und anderen Städten im weiteren Umkreise Spannungserhöhung durch stehende Umformer auf 20000 bis 30000 Volt an. Als Polwechselzahl wurde aus verschiedenen später darzulegenden Gründen die Zahl 3000 per Minute angenommen, wie sich aus unserer obigen Angabe — zwölfpolige Dynamo mit 250 Touren — bereits ergiebt.

Die Ströme, welche von den Dynamomaschinen geliefert werden, gelangen durch höchst sorgfältig isolierte Kabel zunächst nach dem Hauptschaltbrett, welches inmitten der projektierten Maschinenanlage seinen Platz gefunden hat. Hier ist dem diensttuenden Ingenieur durch eine Anzahl von Umschaltern und Ausschaltern die Möglichkeit gegeben, jede der Dynamomaschinen mit jedem der äusseren Stromkreise zu verbinden, Maschinen parallel oder getrennt arbeiten zu lassen u. s. w., kurz jede erdenkliche Kombination vorzunehmen. Diese äusseren Stromkreise, nach unseren Begriffen als Speiseleitungen zu bezeichnen, gehen vom Schaltbrett aus durch einen Tunnel aus der Centrale heraus bis an das Ufer des Kanals, überschreiten diesen auf einer überdeckten Brücke und gelangen zu dem auf dem rechten Kanalufer befindlichen Transformatorenhaus. Diejenigen Speiseleitungen nun, welche für die nähere Umgegend im Radius von 3 bis 5 km bestimmt sind, passieren das Transformatorenhaus direkt, da schon die Maschinenspannung von 2400 Volt genügt für die verhältnismässig geringen Entfernungen. Diejenigen

dagegen, welche die Stromlieferung für beträchtlich entfernte Punkte übernehmen sollen, sind an Transformatoren angeschlossen, welche ihre Spannung heraufsetzen bei entsprechender Verminderung der Ampèrezahl.

Am Endpunkt dieser hochgespannten Fernleitungen sorgen Transformatoren für die Umsetzung der Spannung auf niedere Voltzahl je nach den Zwecken, für welche die Kraft verwendet wird.

Die Apparate und Motoren, welche die Konsumenten der elektrischen Energie erhalten, hängen wesentlich von der Art ihrer Verwendung ab. Im Falle, dass ein Abnehmer grosse Elektromotoren wünscht, so findet in der näheren Umgebung der Centralstation, wo also mit 2400 Volt Verteilungsspannung gearbeitet wird, keine Reduktion dieser Spannung statt, sondern es werden die Motoren direkt an das Hochspannungsnetz angeschlossen. Sind indessen kleine Elektromotoren erwünscht, so wird das Potential durch geeignete Transformatoren, wie bei kontinentalen Wechselstromanlagen üblich, auf etwa 100 Volt heruntergesetzt. Alle diese Motoren sind natürlich zweiphasige Wechselstrommotoren nach dem Teslaschen System. Die gleiche Umformung auf niedere Spannung findet statt, wenn der Wechselstrom zum Schmelzen oder Schweissen benutzt werden soll, oder wenn Wechselstrom-Gleichstromumformer zu elektrolytischen oder Beleuchtungszwecken benötigt werden. Auf einzelne dieser Verwendungszwecke werden wir bei näherer Beschreibung einiger industrieller Anlagen in der Nähe der Fälle, welche ihren Kraftbedarf von der Centralstation decken, einzugehen Gelegenheit finden.

Es ist hier wohl am Platze, darauf hinzuweisen, dass man bei uns in Deutschland in ungerechtfertigter Weise vor allem die Wahl der niederen Polwechselzahl des Systems kritisiert hat; ist doch von mancher Seite ausgesprochen worden, dass bei 3000 Polwechsel per Minute die Anlage zu Beleuchtungszwecken unbrauchbar sei. Nun, es ist den Amerikanern und ihren beratenden Ingenieuren wohl zuzutrauen, dass sie das selbst vorher gewusst haben; man hat sich indess ganz richtig gesagt, dass die Verwendung der Kraft für Beleuchtungszwecke gegenüber dem reinen Motorenbetrieb ein so geringfügiger Teil für absehbare Zeiten sein wird, dass es unangebracht wäre, die grossen Vorteile, welche die niedere Polwechselzahl für den Bau der Motoren, Transformatoren und nicht zum wenigsten der Generatoren bietet, aus der Hand zu geben. Zudem ist es streng genommen nicht richtig, wenn in dieser Allgemeinheit behauptet wird, dass 3000 Polwechsel den Lichtbetrieb ausschliessen. Es ist anzunehmen, dass die amerikanischen Annahmen, wonach 100voltige Lampen von 20 bis 30 Kerzen recht befriedigend brennen, auf sorgfältigen Versuchen beruhen. Nur Lampen mit dünnen Kohlenfäden, wie z. B. 8 bis 10kerzige Lampen von 100 Volt, zeigen dem Auge ein unangenehmes Flimmern. Selbstverständlich ist eine Bogenlichtbeleuchtung nicht denkbar, da diese bei den besten Wechselstrombogenlampen 5000 Polwechsel erfordert. Indessen hat man sich in Amerika die ganze Beleuchtungsfrage so gedacht, dass man Elektromotoren an die Stelle der Dampfmaschinen setzt, welche jetzt zum Antrieb der Bogen- und Glühlichtmaschinen in allen Städten der Umgegend in Gebrauch sind. Da die Elektromotoren billiger arbeiten als diese Dampfmaschinen, so ist diese Lösung als glücklich zu bezeichnen. Indessen, wie schon bemerkt, legt man in den massgebenden Kreisen wenig Gewicht auf die Ausnutzung der Kraft zu Beleuchtungszwecken; nicht zum wenigsten mag bei diesen Anschauungen auch der Umstand mitgewirkt haben, dass die Teslaschen Versuche über

die Beleuchtung mit ausserordentlich hohen Polwechselzahlen und Spannungen den Amerikanern naturgemäss mehr Eindruck machen mussten als uns, die wir weniger darüber zu hören in der Lage sind. Sollte der weitere Ausbau der TESLAschen Ansichten für praktische Zwecke gewinnbringend sein, so wäre sicher die Niagara Falls Power Company eine der ersten Gesellschaften, die sich im Bedarfsfalle zur Aufstellung der nötigen Maschinerie entschliessen würde.

Die Höhe einer jeden Maschine von Unterkante Fundamentplatte bis zur Oberkante Boden der Bürstenbrücke beträgt 3,5 m. Die Fundamentplatte der Maschine, welche den feststehenden Anker trägt, hat einen Durchmesser von 4,27 m; und der Aussendurchmesser des rotierenden Feldmagneten ist 3,53 m. Jeder Generator liefert 5000 elektrische Pferdekräfte, das heisst ungefähr 3700 Kilowatt; er erfordert bei voller Belastung eine Turbinenleistung von etwa 5150 effektiven Pferden, was einem Nutzeffekt von 97 % entsprechen würde. Wenn man von der Bürstenbrücke, deren Schutzgeländer noch etwas höher ist als der höchste Punkt der Maschinenachse, absieht, so lässt sich eine solche Dynamomaschine in einem Raume unterbringen, welcher etwa $4^1/_2$ m im Cubus enthält.

Das Gewicht einer Maschine beträgt 77000 kg, davon entfallen 36000 kg auf den rotierenden Teil — also Achse mit Feldmagnet — und 41000 kg auf Anker, Lager und Fundamentplatte. Da die Tourenzahl 250 per Minute beträgt, so ergiebt sich als Umfangsgeschwindigkeit die erstaunliche Zahl von 47 m. Wir erinnern uns aus dem weiter oben gesagten, dass die International Niagara Falls Commission auch das Projekt für die Generatoren ausgearbeitet hatte; die Gewichtsverhältnisse und Umfangsgeschwindigkeit der von der Westinghouse Company gelieferten Dynamos entsprechen genau dem von der Kommission geforderten.

Die Station ist mit einem 50 Tonnenkran mit elektrischem Antrieb versehen, welcher aus der Fabrik von WM. SELLERS & Co. in Philadelphia stammt. Mittels dieses Krans ist es möglich, jeden Teil der elektrischen und hydraulischen Maschinenanlage zu bewegen und fortzurücken, wenn es nötig sein sollte.

Die Demontage einer Dynamomaschine würde sich also in der folgenden Weise vollziehen:

Zunächst werden die Schleifringe von der Achse abgezogen und darauf die Plattform entfernt. Darauf wird der Keil, welcher den sogenannten „driver“ auf der Achse festhält, herausgenommen und dann der noch immer festsitzende, weil konisch aufgesetzte, driver mit daran hängendem Magnetgestell zunächst durch eine hydraulische Pumpe von der Achse gelockert und sodann mittels des Krahnes gehoben. Darauf werden die Lager und Lagerträger von der Achse abgestreift und letztere selbst, nachdem die Kupplung mit der langen Trubinenwelle gelöst ist, herausgehoben. Auf diese Weise ist nun innerhalb des Ankers ein freier Raum von etwa $1^1/_2$ m Durchmesser entstanden, durch welchen Teile der Turbinenwelle oder andere Maschinenteile aus dem Turbinenschacht herausbefördert werden können.

Wir wollen an dieser Stelle nicht verfehlen, auf den Grund hinzuweisen, welcher die International Niagara Falls Commission bewogen hat, den innen liegenden Anker fest und die aussen liegenden Pole rotierend anzuordnen. Wir nach unseren deutschen Konstruktionslehren hätten wohl lieber Innenpolmaschinen gewählt — thatsächlich ist auch genug Platz im

Innern des Ankers zur Unterbringung eines Gussstahlmagneten mit einer einzigen Spule.

Die Anordnung der Polschuhe aussen bezweckt nichts weiter, als die Centrifugalkraft zu schwächen durch die Anziehung, welche der Anker auf den Feldmagneten ausübt, während allerdings bei Innenpolmaschinen die Centrifugalkraft noch verstärkt wird. Indessen, so richtig an und für sich dieser Gedanke ist, so wird man bei uns gerade dieser Aussenpolanordnung keinen Beifall zollen können, da sie eine Menge Komplikationen in die Konstruktion hineinbringt, welche bei Innenpolmaschinen von gleichem Schwungradeffekt hätten vermieden werden können.

Anker und Feldmagnet werden ventiliert durch eine Anzahl von Löchern, die sich oben auf dem „driver" befinden und mit Windfängen, kleinen Ventilatorflügeln, versehen sind. Sie wirken indes als Exhaustoren, indem der driver von oben gesehen rechts herum rotiert, und so die heisse Luft aus dem Innern der Maschine hervorgesaugt wird. Ob diese Kühlung nun gerade nötig sein soll bei zweckentsprechend dimensionierten Maschinen, darüber liesse sich ja streiten; indes muss man immerhin bedenken, dass die entwickelte Wärmemenge etwa 150 Pferdekräften äquivalent ist, nämlich dem Unterschied zwischen der indizierten und effektiven Leistung der Dynamo.

Die Maschine ist mittels 8 Stück $2^1/_2$zölliger Bolzen, welche bis auf die Sohle der Betonschicht hinunterreichen und dort in sicher vermauerte Gussstücke eingeschraubt sind, verbolzt. Das ganze Mauerwerk des Steinfundaments besteht aus besten Blöcken der Queenstown-Kalksteinbrüche, ebenso der Gewölbebogen, welcher den Turbinenschacht abdeckt.

Auf der gusseisernen Grundplatte ist der Ankersupport aufgeschraubt, ein einfaches Gussstück cylindrischer Form, welches mit einer Anzahl von vertikalen Rippen versehen ist, die unten in einen breiten Flansch auslaufen. Über diese Rippen wird der Anker in heissem Zustande (natürlich noch ungewickelt) hinübergezogen, sodass er auf dem Flansch aufsitzt. Einige der Rippen des Supports sind mit Keilnuten versehen, die ihrerseits mit Keilnuten an der Innenperipherie des überzogenen Ankers sorgfältig so aufgezogen sind, dass die Keilnuten genau übereinander liegen; dann wird der freie Raum der Nuten mit Metall ausgegossen.

Während wir so gesehen haben, wie dieser Support aussen den Anker trägt, dient er im Innern, welches oben und unten nach Art eines abgestumpften Kegels ausgebildet ist, zur Aufnahme eines zweiten hineingekeilten Gussstückes, in welchem das obere und das untere Lager sitzen. Die Lager selbst bestehen aus dem besten Metall und sind zweiteilig, um nachstellen zu können. Sie werden geschmiert durch unter Druck stehende Ölhähne an zwei Stellen; das Öl fliesst aus einem Reservoir herzu, welches sich etwa 8 m hoch über dem untersten Ölhahn befindet. Nachdem das Öl die Lager passiert hat, fliesst es ab, wird filtriert und wieder in das Bassin zurückgepumpt. Ausserdem werden die Lager durch Wasser gekühlt, welches der städtischen Wasserleitung entnommen wird; dasselbe steht also auch unter Druck. Für die Sicherung der Lager ist also in doppelter Weise gesorgt.

Der Anker ist zusammengesetzt aus einzelnen Blechscheiben von etwa 1 bis 3 mm Dicke, jede Blechscheibe für sich besteht wieder aus 11 Segmenten, die einander überlappen. Um eine gute Luftcirkulation auch inner-

halb der Ankerscheiben zu gewährleisten, sind die letzteren nicht sämtlich fest aufeinander gezogen, sondern sechs Lücken gelassen von etwa 25 mm, um hier die Luft durchstreichen zu lassen. Um Foucaultströme zwischen den Eisenblechen zu vermeiden, hat man nicht, wie sonst üblich, Papierscheiben zwischen die einzelnen Blechscheiben gelegt, sondern man hat die Scheiben künstlich durch Anlassen oxydiert, ein Mittel, welches zuweilen aber doch nicht die gewünschte Isolationssicherheit bieten wird.

Dieser so aufgebaute Ring oder besser gesagt Cylinder aus Eisenblechen wird durch im ganzen 66 achsiale Bolzen aus Nickelstahl zusammengehalten. Der Nickelstahl enthält einen sehr erheblichen Prozentsatz Nickel, welches bekanntlich geringwertige magnetische Eigenschaften besitzt, sodass die Bolzen thatsächlich praktisch unmagnetisch sind. Die Bolzen sind isoliert eingezogen, da sie mit den Eisenscheiben nicht in Berührung kommen dürfen, um nicht Wirbelströme hervorzubringen. Der Cylinder aus Eisenblechen findet oben und unten in der üblichen Weise seinen Abschluss und seine Stabilität durch je eine grosse dicke Messingscheibe. Beim Anziehen der Bolzenmuttern wird gleichzeitig der Cylinder durch Handpressen zusammengedrückt, damit sich die einzelnen Bleche fest gegeneinander legen. Die sechs Lücken, welche in gleichen Abständen in radialer Richtung zwischen den Scheiben gelassen sind, werden zum geringsten Teile durch Messingsegmente ausgefüllt, zum grössten Teil sind sie, wie schon erwähnt, offen, um eine gute Luftcirkulation zu haben.

Der Ankercylinder wird nun innen sauber ausgebohrt, damit er auf die Rippen des Ankersupports passt, auf welche er, wie erwähnt, aufgesetzt wird, darauf wird er in heissem Zustande — er ist natürlich noch ungewickelt — über den Support gestreift und auf den Flansch des letzteren aufgesetzt; er erkaltet dann und setzt sich äusserst fest in seine Lage.

Die Wicklung des Ankers ist in 187 radialen, etwa 90 mm tiefen und 20 mm breiten Nuten untergebracht. Die Nuten sind in jede einzelne Blechscheibe gestanzt, ihre Form ist nicht ein Rechteck, vielmehr verjüngen sie sich an der Öffnung und sind fast geschlossen — wie man bekanntlich auch bei uns jetzt die Wechselstromdynamos und vor allem die Motoren baut. In jeder Nute liegen zwei Flachkupferstäbe von $11 \times 34$ mm, deren scharfe Kanten indes zweckmässig abgerundet sind, damit sie die umhüllende Isolationsschicht nicht durchschneiden. Diese Isolation, welche bei einer derartigen Anlage von der allerhöchsten Wichtigkeit ist, besteht aus Mika (Glimmer). Jeder Leiter ist gegen seinen Nachbarleiter und gegen das Eisen des Ankers gesichert; und damit man die Überzeugung von der Güte des verwendeten Glimmers erlangte, wurden die einzelnen Stäbe und später der fertige Anker einer Spannung von 15000 resp. 6000 Volt zwischen Leiter und Isolationsschicht ausgesetzt, ohne dass nachteilige Folgen eingetreten wären. Die Flachkupferstäbe ragen oben und unten ein Stück aus den Nuten hervor; um die einzelnen Stäbe nun zu geschlossenen Windungen zu vereinigen, sind Verbindungsstücke von Flachkupfer angesetzt; diese sind aus grösseren Platten ausgestanzt und durch Spezialpressen in ihre besondere Form gebracht. Diese Verbindungskupfer sind ebenfalls mit Glimmer- und — an weniger gefährdeten Stellen — mit Gummiisolierband beklebt. Natürlich ist es ausserordentlich wichtig, dass zwischen den Kupferstäben innerhalb der Nuten und den Verbindungsstücken ein guter haltbarer Kontakt besteht; es sind deshalb die letzteren nicht nur angeschraubt, sondern auch

verlötet. Die Verschraubung geschieht durch drei Bolzen, deren Köpfe versenkt werden; nachdem von der anderen Seite die Mutter aufgesetzt ist, wird das vorstehende Bolzenende gespleist und zu einem Nietkopf auf die Mutter geschlagen. Die Verbindung ist nun unlösbar. Darauf wird das ganze verlötet mit Zinn und zwar in sehr praktischer Weise, indem die Lötstelle durch einen Strom geringer Spannung, aber sehr hoher Stärke in wenigen Sekunden erhitzt wird.

Die Wicklung und Verbindung der Ankerkupferstäbe wurde im Maschinenhause der Niagara Falls Company ausgeführt, nachdem der Anker schon auf den Support und das richtige Fundament aufgesetzt war. Der Transport aus den Werkstätten der Westinghouse Company wäre andernfalls auch, schon wegen des erhöhten Gewichts durch die Zusammensetzung von Support und Anker, zu schwierig geworden. Nach erfolgter Verbindung der $2 \times 187$ Kupferstäbe bildet die Ankerwicklung zwei voneinander getrennte Stromkreise, deren jeder 2400 Volt abgiebt und gegen den anderen um $90^0$ in der Phase verschoben ist; also zweiphasiger unverketteter Wechselstrom.

Wenn wir nun zu den rotierenden Maschinenteilen übergehen, so beginnen wir am besten mit der Beschreibung der Achse. Sie wurde aus bestem Stahl geschmiedet und roh überdreht von der Cleveland City Forge and Iron Company. An den Lagerstellen ist der Durchmesser 330 mm. Am oberen Ende, zur Aufnahme des „drivers“ mit dem Magnetring, ist sie konisch verjüngt; am entgegengesetzten, zur Ankupplung an die Turbinenwelle, trägt sie eine Kupplungshälfte, deren Flanschdurchmesser circa 700 mm ist. Die Kupplung ist verbolzt mit acht konisch eingesetzten Bolzen. Am obersten Ende, noch über der Verjüngung zur Aufnahme des „drivers“, ist Gewinde eingeschnitten; hier befinden sich bekanntlich die Schleifringe, welchen der Strom zur Erregung der Magnetpole zugeführt wird. Es ist interessant zu vernehmen, dass die Amerikaner mit äusserster Vorsicht von der Achse und anderen Teilen der beweglichen Maschinenteile, Materialproben entnahmen und die üblichen Bestimmungen zu machen nicht unterlassen haben. Die Achse war um ein Stück länger geschmiedet worden; dieses Stück wurde, mehrere Zoll lang, abgeschnitten, und aus ihm fünf Proben entnommen in der gewöhnlichen Stabform mit Vierkantenden und rund gedrehtem Mittelstück. Und zwar wurden zwei Stäbe von der Peripherie, ein Stab aus der Mitte und zwei Stäbe von zwei zwischen Mitte und Peripherie liegenden Stellen der Achse gewählt. Im Pittsburgher Versuchslaboratorium probiert, ergab sich, dass die Zugfestigkeit und die Elastizitätsgrenze an der Peripherie am grössten, im Mittelpunkte der Achse am kleinsten war. Es ist das ja eine bekannte Thatsache. Die Mittelwerte waren nach diesen Versuchen

4220 kg pro qcm Zugfestigkeit und
2200 „ „ „ Elastizitätsgrenze.

Der sogenannte „driver“, das Schwungrad, welches den Feldmagnetring trägt und die Bewegung der Achse diesem vermittelt, ist wie schon bei Besprechung der Achse erwähnt, konisch auf letztere aufgesetzt. Eine starke Keilnut in dem Achsenloch des „driver“ entspricht der Keilnut des konischen Achsenstücks; beide werden durch einen langen massiven Stahlkeil ausgefüllt. Der driver besteht aus weichem Gussstahl. Eine Zugfestigkeit von circa 4000 kg pro qcm war von der Midvale Steel Company in Philadelphia garantiert worden; indessen zeigten einige Proben, die der Peripherie des ersten

driver entnommen wurden, eine Zugfestigkeit von über 5200 und eine Elastizitätsgrenze von über 3000 kg. Die Bruchfläche war strähnig und feinkörnig. An der Aussenseite sind die „driver" abgedreht, an der Innenseite ist der Hohlraum durch sechs starke Rippen versteift.

Der bei weitem interessanteste Teil der Maschine ist, wenigstens was die Herstellung und Montage betrifft, der Magnetring mit seinen zwölf Polstücken. Er zeigt nicht nur die geradezu wunderbaren Eigenschaften des Dynamostahls in physikalischer, d. h. mechanischer und magnetischer Beziehung, sondern beweist auch, auf welcher Höhe die Schmiedekunst Amerikas angelangt war, und stellt der Firma Bethlehem Iron Company, der Verfertigerin, ein ausgezeichnetes Zeugnis ihrer Leistungsfähigkeit aus. Der Magnetring ist ein Hohlcylinder, da die Polstücke einzeln angeschraubt sind. Er ist in einem Stück ohne Schweissnaht geschmiedet. Die garantierte Zugfestigkeit von 500 kg, sowie die gewährleistete Elastizitätsgrenze von 2700 kg ist von der Gesellschaft nicht nur erreicht, sondern erheblich überschritten worden. Drei Proben, welche der Peripherie des ersten Magnetringes entnommen wurden, zeigten eine gegen die garantierte um 17 % höhere Zugfestigkeit, um 30 % höhere Elastizitätsgrenze.

Die Herstellung der Ringe geschah folgendermassen: Ein Cylinder aus Dynamostahl (Durchmesser 1,4 m, Länge 5 m, Gewicht 55 t) wurde in einem Stück gegossen und sowohl in flüssigem Zustande als auch während der Abkühlung mittels hydraulischer Pressen zusammengedrückt. Darauf wurde in achsialer Richtung ein Loch durchgebohrt und der so entstandene Hohlcylinder auf Mass abgeschnitten. Dieser Hohlcylinder wurde nun — mittels eines Mandrills — unter einer hydraulischen 14000 Tonnenpresse geschmiedet, bis er die vorgeschriebene Form des Feldmagnetringes angenommen hatte. Nach diesem Schmiedepressverfahren wurden die physikalischen Eigenschaften untersucht, und nach gutem Befund derselben, der Ring ausgebohrt und abgedreht. Nicht nur Zugfestigkeit, Elastizitätsgrenze und magnetische Permeabilität des Materials sind es, welche diesen Körper zu einer ausserordentlichen Leistung der beteiligten Firmen machen; auch die enorme Grösse seiner Dimensionen und des Gewichtes ist ohne Vorgänger in der elektrotechnischen Industrie.

Warum die Herstellung des Ringes eine so ausserordentlich sorgfältige war, um jede Fehlerstelle im Innern des Stückes zu vermeiden, dürfte genügend klar werden, wenn wir uns die Umfangsgeschwindigkeit desselben ausrechnen. Sie beträgt bei 250 Touren **47 m per Sekunde** und ruft eine Centrifugalkraft von 360 kg hervor. Es ist nun aber nicht genügend, bei Turbinenbetrieb die Magnetringe für die eben gegebenen Werte widerstandsfähig zu machen; vielmehr mussten sie mit Rücksicht auf ein eventuell eintretendes Durchgehen der Turbinen einer bedeutend höheren Tourenzahl Widerstand leisten können. Man besitzt aus der Konstruktion der Turbinenregulatoren die Gewissheit, dass eine Tourenzahl von 400 absolut nicht überschritten werden kann. Dieser Umfangsgeschwindigkeit von 75 m sind aber die Magnetringe noch völlig gewachsen; nach der Berechnung dürften sie erst bei 800 Touren gesprengt werden. Bei 400 Touren, 75 m Geschwindigkeit der Peripherie, beträgt die Centrifugalkraft rund 920 kg, da nun die Elastizitätsgrenze nach den oben gegebenen Werten bei 3600 kg ungefähr liegt, so ist die Sicherheit bei 400 Touren noch eine vierfache; bei der

normalen Geschwindigkeit von 250 Touren, 47 m Peripheriegeschwindigkeit, 360 kg. Centrifugalkraft ist der Sicherheitsfaktor 10.

Über dem „driver“ über der Plattform sitzt auf dem mit Gewinde versehenen Achsenende eine Buchse, welche die beiden Schleifringe zur Aufnahme des Gleichstroms trägt. Dieser Strom, von besonderen kleinen Gleichstrommaschinen erzeugt, wird von diesen Gleichstrommaschinen aus unter dem Boden des Maschinenhauses zum Fundament der grossen Dynamos geleitet, durch in Eisenrohren verlegte Kabel durch letzteres hindurch und im Innern einer der Säulen, welche die Plattform tragen, bis zu der einen Schleifbürste geleitet; er tritt in einen Schleifring ein und gelangt durch ein Kabel zu der Magnetwicklung der zwölf Polstücke, passiert dieselben und kehrt durch den zweiten Schleifring zu der auf letzterem schleifenden anderen Bürste zurück und gelangt von dort auf dem gleichen Wege innerhalb einer Säule und unter dem Fussboden zu der Gleichstrommaschine zurück. Die zwölf Polstücke, welche der Strom nacheinander umkreist, sind aus weichem Holzkohleneisen, wie es gewöhnlich nur zu Ankerblechscheiben verwendet wird.

Die Wicklung besteht aus rechteckigen isolierten Kupferstäben, welche zu Windungen gebogen und auf zwölf Messingspulen aufgewunden sind.

Das Gewicht der rotierenden Teile der Dynamomaschine, der Turbinenachse und Dynamoachse beträgt etwa 69 000 kg; durch die besondere Konstruktion der Turbinen wirkt ständig — ganz unabhängig davon, ob die Turbine im Betrieb ist oder nicht — ein Wasserdruck von 67 500 bis 70 500 kg aufwärts und entlastet dadurch die Lagerstellen der Achse. Im Falle des unbelasteten Laufs der Maschine ergiebt sich somit ein Druck von 1500 kg abwärts gerichtet; wenn die Maschine unter voller Belastung läuft, so überwiegt der Wasserdruck und die Richtung des Druckes von 1500 kg ist nach oben gerichtet. Um diesen verhältnismässig geringen Druck aufzunehmen, ist nur ein einziges Lager vorhanden; durch die übrigen Lager geht die Achse glatt hindurch; sie dienen lediglich zur Führung der letzteren. Mit Rücksicht auf die Länge der ganzen Achse von den Turbinenrädern bis zu den Schleifringen der Dynamomaschine (60 Meter total) und mit Rücksicht auf das Gewicht des als Schwungrad wirkenden Feldmagneten war es notwendig, den letzteren genau auszubalancieren. Zu dem Zwecke wurde in den Werkstätten der Westinghouse Company erst der „driver“ und dann nochmals „driver“ mit angebolztem Feldring aus Nickelstahl genau ins Gleichgewicht gebracht. Durch die konische Lagerstelle des „driver“ wurde eine Buchse gesteckt, in welche der Bolzen eines starken Zuganges eingeschraubt wurde. An seinem unteren Ende war der Bolzen halbkugelförmig ausgedreht und sass auf dem halbkugelförmig zugespitzten Ende einer Achse, welche durch die Lager der Dynamo hindurchgesteckt war. Die Achse ruht in einem Fusslager, und zwar nicht auf dem Lagermetall, sondern auf einer Schicht von unter Druck stehendem Öl, sodass also eine Lagerreibung praktisch nicht vorhanden war, welche die Resultate hätte fälschen oder doch mindestens das Ausbalancieren erschweren können, da der Druck des Öles genügend war, das Gewicht der auf ihm lastenden Massen zu kompensieren. Das Ausbalancieren erfolgte durch Eisenplatten, welche man im Innern des „driver“ oder des Magnetringes annietete. Diese Methode wurde angewandt einmal bei ruhenden Massen und dann, während der driver und Magnetring in Rotation versetzt waren.

Wir wollen nun noch einen Blick auf die Anordnung des Schaltbrettes werfen. Es ist einleuchtend, dass bei einer so gewaltigen Stromerzeugungsanlage — denn man rechnet später auf etwa 30 Dynamomaschinen von je 5000 PS — es nicht zweckmässig gewesen wäre, sämtliche Maschinen parallel zu schalten und die Schalt- und Messapparate auf eine Tafel zu vereinigen. Ausserdem sprach schon der Umstand gegen eine solche Anordnung, dass der Maschinenstrom von 2400 Volt erstens direkt in der näheren Umgebung von einigen Kilometern Radius zur Anwendung gelangte, während für ferner liegende Orte wie Buffalo die 2400 Volts zu gering sind, um ökonomisch übertragen zu werden, vielmehr eine Umformung auf 10 bis 25000 Volt hier nötig wird. Somit teilen sich schon von vornherein die Dynamos in zwei Gruppen: erstens diejenigen, welche die Speiseleitungen des Lokalbezirks versorgen, und zweitens diejenigen, welche ihren Strom in das auf dem anderen Kanalufer der Station gegenüber gelegene Transformatorenhaus senden, um durch stehende Wechselstromtransformatoren auf sehr hohe Spannung umgeformt zu werden. Die Maschinen einer jeden Gruppe können unter sich parallel geschaltet werden; um jedoch die Schaltbrettanlage allen vorkommenden Fällen von vornherein anzupassen, ist es möglich, sogar Maschinen der einen Gruppe in die andere hinüberzuschalten und schliesslich sämtliche Maschinen parallel laufen zu lassen. Wie indes schon hervorgehoben, dürfte es übersichtlicher sein, mindestens in zwei Gruppen zu arbeiten.

Die Plattform zur Aufnahme des Schaltbrettes für die fünf zunächst aufgestellten Dynamomaschinen befindet sich in der Mitte des Maschinenhauses in bedeutender Höhe. Die Plattform ist 17 m lang, 4 m breit und $2^1/_2$ m hoch. Oben auf derselben stehen die Instrumententafeln, und zwar fünf Dynamoschaltbretter — für jeden Generator eins — zwei für Rotationstransformatoren, mittels welcher Wechselstrom in Gleichstrom zur Magneterregung umgeformt wird, und ein sechstes für eine mit Dampfmaschine gekuppelte Gleichstrommaschine, welche aushilfsweise als Erregermaschine Verwendung findet. Unter den Schaltbrettern befinden sich die Regulatoren für die Magnetspulen der Generatoren, und unter der Plattform im Innern der Brücke sind die Ausschalter und Umschalter untergebracht, welche durch Hebel von oben aus bedient werden.

Die Rotationstransformatoren erhalten nicht direkt den hochgespannten Wechselstrom von 2400 Volt; es sind stehende Wechselstromtransformatoren vorgeschaltet von je 100000 Watt, welche von 2400 Volt auf eine niedrigere Spannung umformen.

Die „Pittsburgh Reduction Company“ erhält durch die Speiseleitungen von der Centrale aus 2400 Volt zweiphasigen Wechselstrom; in der Fabrik wird derselbe zunächst auf 115 Volt Wechselstrom durch stehende Transformatoren umgewandelt; darauf wird er in Rotationstransformatoren geleitet und in 160voltigen Gleichstrom umgesetzt. Trotz der auf den ersten Blick etwas kompliziert erscheinenden Umsetzung ist doch bei dem hohen Nutzeffekt 1000pferdigen Maschinen — von denen hier zwei vorhanden sind — kein nennenswerter Verlust damit verbunden.

Zweitens hat eine ebenfalls in der Nähe der Station gegründete Carborundumfabrik einen Kraftbedarf von etwa 1000 Pferden an elektrischer Energie. Während aber bei der Aluminiumfabrikation des elektrolytischen Prozesses halber Gleichstrom nötig ist, so wird bei dem Schmelzprozess der Carborundumfabrikation Wechselstrom angewendet, der in diesem Falle ja

dem Gleichstrom ebenbürtig ist. Es ist also in dieser Fabrik nur nötig, den hochgespannten Strom von 2400 Volt durch stehende Transformatoren auf 100 bis 200 Volt umzusetzen.

## VII.

In neuester Zeit hat sich die elektrische Kraftübertragung, man darf sagen, mit einigem Erfolg, eines Gebietes bemächtigt, welches bei den jetzigen Zeitläufen, der enormen Hebung der Industrie und des Handels, ausserordentlich aussichtsreich erscheint. Wir meinen die Beförderung von Schiffen auf Kanälen.

In Deutschland hat die Firma Siemens & Halske auf dem Finowkanal umfangreiche Versuche angestellt über elektrische Schleppschiffahrt. Der Teil der Versuche, welcher als gelungen bezeichnet werden muss, basiert auf folgendem Prinzip. An der Seite des Kanales, d. h. auf dem festen Boden, fährt ein kleiner Motorwagen ziemlich primitiver Natur auf ein oder zwei Schienen, bedient durch einen mitfahrenden Wärter. Der kleine Motorwagen entnimmt wie üblich durch Rollenkontakt seinen Betriebsstrom einer Oberleitung und zieht mittels Seil das zu befördernde Schiff oder mehrere Schiffe zugleich in dem Kanal vorwärts. Die ausgedehnten Versuche von Siemens & Halske haben die Durchführbarkeit dieses Betriebes erwiesen; der Betrieb ist nicht nur technisch durchführbar, sondern vor allen Dingen praktisch rentabel gegenüber dem bisherigen Schleppdampferverkehr.

Es interessiert gleichzeitig, zu erwähnen, dass in Belgien auf dem Kanal, welcher Brüssel mit Charleroy verbindet, eine derartige Anlage, und zwar von Brown, Boveri & Co. ausgeführt, sich in vollem Betriebe bereits befindet und zwar unter Zugrundelegung des Drehstromsystems mit drei oberirdischen Zuführungsleitungen. Die Centrale für diese Anlage umfasst drei Dampfmaschinen, welche mit Riemenbetrieb auf drei Drehstromdynamomaschinen von je 100 PS arbeiten. Die Tourenzahl der Dynamos beträgt 400 Touren; sie erzeugen einen dreiphasigen Wechselstrom von 40 Perioden in der Sekunde und geben an ihren Klemmen direkt eine Spannung von 6000 Volt ab. Ausserordentlich interessant ist, dass die Dynamomaschinen ohne jede Transformation das Netz direkt mit dieser hohen Spannung speisen.

Die Kanalanlage umfasst gewissermassen vier elektrische Netze:

1) das erwähnte Primärnetz mit 6000 Volt Spannung,
2) die Oberleitungslinie mit drei Kontaktdrähten von 300 Volt,
3) das Beleuchtungsnetz

und schliesslich

4) ein verzweigtes, aber sehr notwendig erscheinendes privates Telephonnetz.

Auch hier wird wie bei Siemens & Halske die Beförderung der Schiffe durch kleine Lokomotiven bewirkt, welche auf dem Ufer des Kanals auf demselben Treidelweg laufen, auf welchem früher die Pferde gingen. Der Weg ist indessen seitens der Gesellschaft auf eine Breite von 1,25 m makadamisiert worden, da die Lokomotiven nicht etwa mit Spurkranzrädern auf Schienen, sondern mit gewöhnlichen allerdings sehr breiten Rädern auf dem gewöhnlichen Grund und Boden laufen. Auf der Lokomotive fährt ein Wärter mit, welcher den Drehstromotor zu bedienen hat.

Die Motoren sind Drehstrommotoren achtpoliger Ausführung, daher 600 Touren in der Minute machend. Ihre normale Leistung beträgt 5 PS; sie lassen sich indessen bis auf 10 PS überlasten.

Eigentümlicherweise ist bei diesen Motoren der Läufer derjenige Teil, welcher den Hochspannungsstrom empfängt, während der Ständer als induzierter Teil mit dem Anlasswiderstand verbunden ist. Natürlich kann der Motor in beiden Drehrichtungen laufen, zu welchem Zwecke ein Umschalter vorhanden ist.

Eine genaue Beschreibung der Anlage, für welche bei der gewaltigen Ausdehnung, welche sie besitzt, ausser der erwähnten ersten Centrale noch zwei weitere im Bau begriffen sind, ist von Herrn P. Desombre bei Charles Herissey in Evreux erschienen.

Es ist zu wünschen, dass unsere deutsche Elektrotechnik auf dem Platze sein wird, wenn es sich darum handelt, für die grossen geplanten Kanalunternehmungen des preussischen Staates die geeigneten Betriebskräfte zu finden, um den zu erwartenden gewaltigen Schleppschiffverkehr in rentabeler Weise durchzuführen. Es könnte unter andern volkswirtschaftlich von höchstem Vorteil sein, derartige Centralen, welche der Trace des Kanals zu folgen haben, nicht nur für die Aufgabe der Schleppschiffahrt, sondern auch für Beleuchtung und Kraftverteilung von vornherein zu errichten.

Nachdem wir nun an Hand verschiedener Anlagen, soweit der verfügbare Raum es gestattet, einen ungefähren Überblick über den heutigen Stand elektrischer Kraftübertragung gegeben haben, bleibt uns noch übrig, mit kurzer Beschreibung und unter Vorführung einer Reihe von Abbildungen auf besondere Spezialkonstruktionen unserer bedeutenderen Firmen einzugehen und zwar besonders auf Konstruktionen, welche eine elegante Lösung der Aufgabe darstellen, Elektromotoren mit Arbeitsmaschinen irgendwelcher Art zu vereinigen.

## Beschreibung elektromotorischer Antriebe.

In erster Linie sind da zu nennen Antriebe von Ventilatoren. Es ist ja von vornherein klar, dass sich wohl kaum irgend eine Maschine so gut wegen ihrer verhältnismässig hohen Tourenzahl zur direkten Kuppelung mit Elektromotoren eignet, als der Ventilator beziehungsweise der Exhaustor, die Umkehrung des Ventilators. Nachstehend bringen wir die Abbildung eines Drehstrommotors in direkter Kuppelung mit einem Hochdruckventilator; der elektromotorische Antrieb ist ausgeführt von der Firma „Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Kolben & Cie.“ in Prag (Fig. 51).

Sodann geben wir im folgenden Bilde (Fig. 52) den elektrischen Antrieb eines Grubenventilators durch einen 5 PS Gleichstromelektromotor der „Union-Elektrizitäts-Gesellschaft“, Berlin; der Motor und der mit ihm direkt gekuppelte Ventilator macht 1000 Umdrehungen in der Minute. An dem Ventilator ist deutlich zu sehen, dass derselbe ursprünglich für Riemenbetrieb eingerichtet gewesen ist, worauf die ausgesparte Stelle in dem Lagerstuhl deutet.

Von einem elektrischen Betriebe von Ventilatoren ist natürlich gerade in Gruben ein ganz besonderer Gebrauch gemacht worden, da hier die Notwendigkeit, schlechte Gase zu entfernen, ebenso dringend war, wie andererseits der Antrieb durch kleine Dampfmaschinen und daher die Verlegung

eines ausgedehnten Dampfleitungsnetzes in der Grube auf Schwierigkeiten stossen muss.

Ein ganz besonderes Gebiet in diesem Genre wird dargestellt durch die kleinen elektrisch betriebenen Zimmerventilatoren, welche wegen ihrer Preiswürdigkeit und ihrer Bequemlichkeit in der Anbringung an der Hand, an der Decke, auf dem Tisch u. s. w. vornehmlich in den Tropen sowie auf grösseren Schiffen sich schnell zu einem unentbehrlichen Luxusgegenstand aufgeschwungen haben. Wir besitzen thatsächlich heute bereits Spezialfabriken, welche sich mit nichts anderem, als mit der Herstellung derartiger kleinen Ventilatoren beschäftigen.

Ein weiteres ganz bedeutendes Gebiet, auf welchem der Elektromotor Grosses geleistet hat, ist der Antrieb von Pumpen. Naturgemäss lassen sich

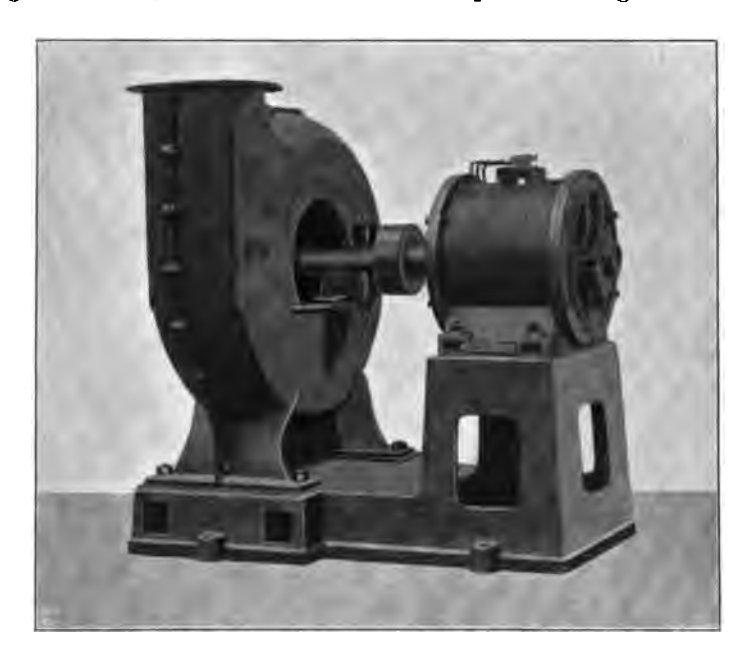


Fig. 51.

hier die Centrifugalpumpen mit ihrer schnellen Tourenzahl erheblich leichter durch Elektromotoren antreiben, als die Kolbenpumpen mit ihrer langsamen Geschwindigkeit. Neuerdings ist indessen durch die Erfindung der Riedler Expresspumpe auch für das letztere System ein grosser Fortschritt gewonnen, da diese Pumpen selbst für grosse Leistungen mit aussergewöhnlich hohen Tourenzahlen arbeiten. Bekannt ist die Thatsache, dass eine derartige Riedler Expresspumpe direkt gekuppelt mit einem grossen Drehstrommotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ein würdiges Ausstellungsobjekt unserer deutschen Abteilung auf der Pariser Weltausstellung des Jahres 1900 gebildet hat. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft hat einen sehr klaren und übersichtlichen kleinen Bericht über diese Riedler Expresspumpe, deren Patente sie besitzt, veröffentlicht.

Die folgende Fig. 53 giebt uns die Ansicht eines mit einer Centrifugalpumpe direkt gekuppelten Drehstrommotors der Firma „Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Kolben & Cie.“ in Prag. Man sieht hier, dass die

elektrotechnische Firma den Zusammenbau der beiden Maschinen ausgeführt hat.

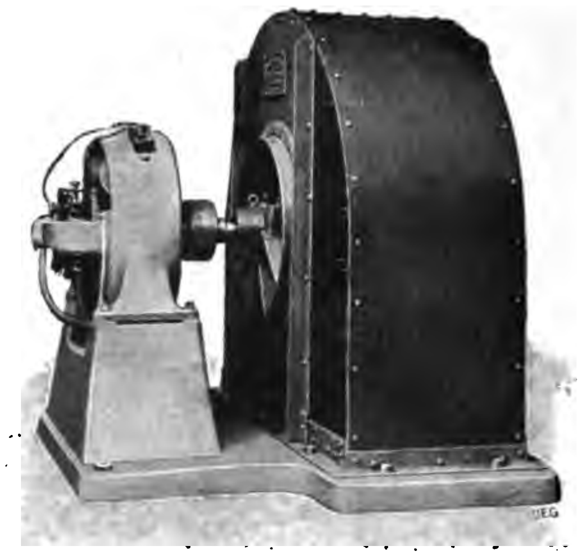


Fig. 52.

Die folgende Abbildung giebt uns den aller Wahrscheinlichkeit nach zur Zeit grössten existierenden Drehstrommotor Europas, nämlich einen 1000 PS zweiphasigen Wechselstrommotor der Firma Brown, Boveri & Co., direkt ge-

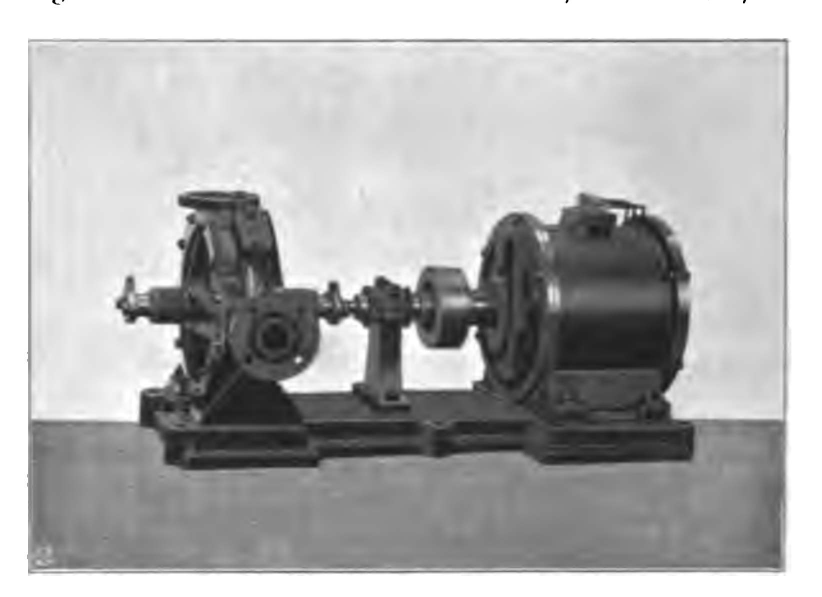


Fig. 53.

kuppelt mit einer Centrifugalpumpe für die Wasserversorgung der Stadt Genf (Fig. 54).

Den Antrieb einer grossen Pumpe und zwar einer Kolbenpumpe durch Gleichstrommotor giebt uns das folgende Bild (Fig. 55). Hier ist nichts von

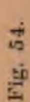


Fig. 54.

der eleganten Einfachheit der direkten Kuppelung wie bei Centrifugalpumpen zu finden; der ausserordentliche langsame Lauf der Kolbenpumpe bedingt eine doppelte Zahnradübersetzung, welche sich allerdings nicht besonders schön ausnimmt. Dieser Antrieb ist von der „Union-Elektrizitäts-Gesellschaft“ ausgeführt.

Im Folgenden bringen wir noch einige instruktive Abbildungen aus dem Bereiche der Hebezeuge. So stellen die beiden folgenden Figuren (Fig. 56 und 57) Laufkranantriebe der Firma „OERLIKON“ dar und zwar den einen angetrieben durch Gleichstrommotoren eingekapselter Bauart, den anderen durch Drehstrommotoren. Die beiden Figuren lassen in ihrer ausserordentlichen Schärfe alle Details genau erkennen.

Gerade der Betrieb von Hebezeugen hat in letzter Zeit an die Elektrotechnik ausserordentliche Ansprüche gestellt, und zwar nicht nur an die Elektromotoren, sondern in mindestens ebenso reichlichem Masse an die Anlassapparate. Der Betrieb von Aufzügen für Lasten und für Personenbeförderung ist ausserordentlich rege geworden, seitdem in Amerika auf diesem Gebiete ganz besonders vorangegangen worden war. Wir würden ein besonderes Eingehen auf dieses Thema nicht vermeiden können, wenn nicht vor ganz kurzer Zeit ein Spezialwerk über den Antrieb der Hebezeuge auf elektrischem Wege erschienen wäre, das empfehlenswerte Buch von NIETHAMMER „Generatoren, Motoren und Steuerapparate elektrisch betriebener Hebezeuge“. Es ist daher jedem, der sich besonders für diesen Teil der elektrischen Kraftübertragung interessiert, das Studium dieses Werkes zu empfehlen.

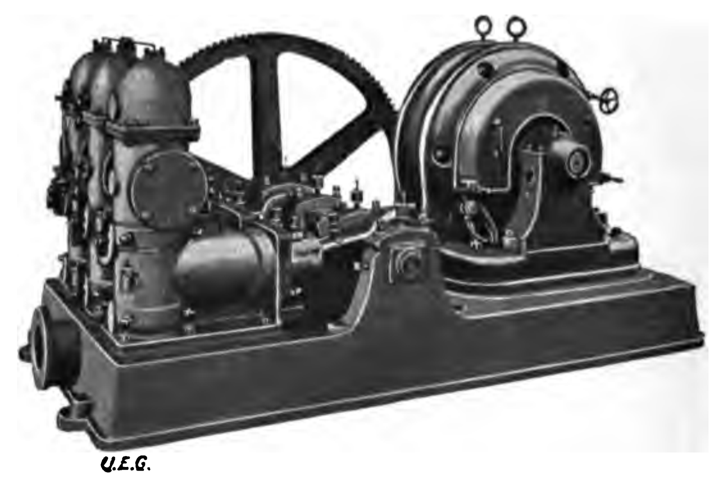



Fig. 55.

Im Nachfolgenden bringen wir die Abbildung einer Lastenaufzugswinde für 1000 kg Tragfähigkeit, ausgeführt von der Firma „Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. KOLBEN & CIE.“ (Fig. 58). Der Antrieb geschieht durch Drehstrommotor, das Einrücken des Anlasswiderstandes geschieht automatisch in der bekannten Weise, dass die Bewegung des Motors selbst auf den Anlasser übersetzt wird.

Einen elektrisch und zwar durch Gleichstrommotor betriebenen Förderhaspel der „Union-Elektrizitäts-Gesellschaft“ stellt Fig. 59 dar.

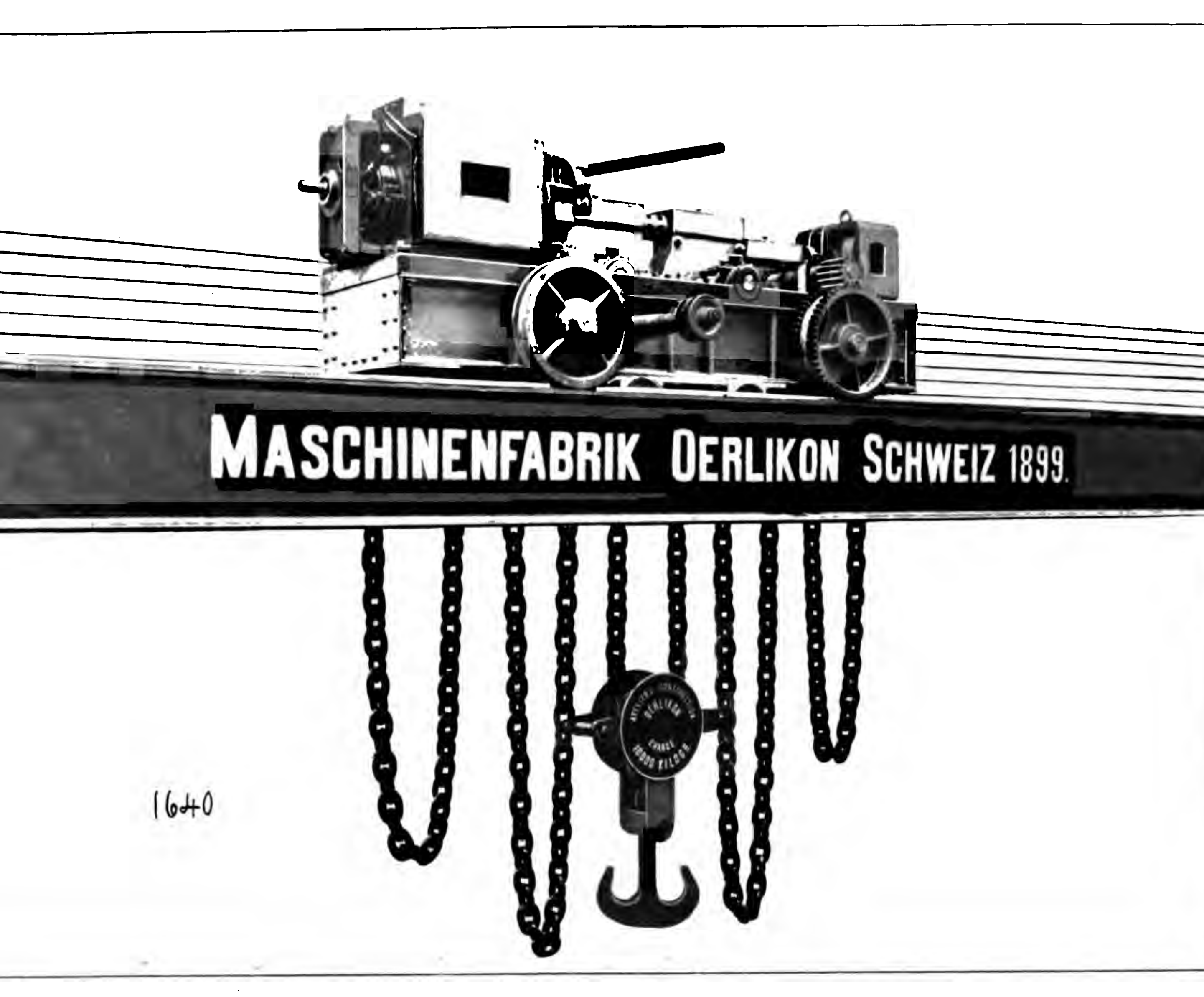



Fig. 56.

Von derselben Firma ausgeführt ist die weiterhin dargestellte elektrische Aufzugswinde mit Gleichstrommotoren (Fig. 60).

Ein ganz besonderes Hauptkapitel der elektrisch betriebenen Hebezeuge bilden die Portalkräne für Hafenanlagen, sowie die ihnen verwandten Drehkräne und ähnliche Ausführungen dieser mit grossen Lasten rechnenden Hebezeuge.

Auch auf diesem Gebiete hat gerade die Firma „Union-Elektrizitäts-Gesellschaft“ sich hervorragende Verdienste erworben, indem sie eine der ersten Gesellschaften war, welche erkannt haben, wie die gesteigerten Ansprüche des Hafenverkehrs gerade die Ausbildung der Lösch- und Ladevorrichtungen auf elektrischem Wege zu einer dringenden Aufgabe der Neuzeit gestalteten. Von Jahr zu Jahr mit der Steigerung des Verkehrs in unseren grossen Häfen wurde an die Hebezeuge die Forderung immer grösserer Kapazität, immer schnellerer und leichterer Manövrierfähigkeit bei absoluter Betriebssicherheit und bei möglichst sparsamen Betriebsbedingungen gestellt.

Nur die Centralisierung der Hebezeuge für einen ausgedehnten Hafenbetrieb gewährleistet die angestrebten Vorteile. Dampfcentralen indessen mit ihren weit zu verlegenden Dampfleitungen anzulegen, ist unthunlich. Dagegen sprechen die Verluste in den Rohrleitungen durch Wärmeausstrahlung und Undichtigkeit sowie die Gefahr des Einfrierens. Hydraulischer Betrieb entbehrt zum Teil der genannten Fehler, besitzt jedoch andere Nachteile. Erst die elektrische Kraftübertragung bot ein vollkommenes Mittel für den sachgemässen Betrieb von Hebezeugen, umsomehr wenn zum Ausgleich der Stösse eine Pufferbatterie dienen kann. Die Regulierfähigkeit der Elektromotoren, die Anpassung der Geschwindigkeit an die zu bewältigende Last, der beschleunigte Rückgang des leeren Hakens sind ebenso grosse Vorteile, wie die Möglichkeit gleichzeitiger Lichtversorgung.

Die Frage, ob Gleichstrom oder Drehstrom für den Betrieb von Hebezeugen vorzuziehen sei, begegnet geteilter Meinung in den Fachkreisen. Es spricht allerdings manches für die Anwendung des Gleichstroms, so die vorzügliche Anzugskraft der Hauptstrommotoren, ihre Regulierfähigkeit in Bezug auf die Tourenzahl und anderes; dass dagegen die grössere Betriebssicherheit bei den Drehstrommotoren zu finden ist, unterliegt wohl keinem Zweifel; es wird daher im wesentlichen auf eine genaue Abwägung der Vorteile und Nachteile beider Motorengattungen im gegebenen Falle ankommen, wenn es sich darum handelt, die Frage des Stromsystems zu entscheiden.

Nachstehend bringen wir noch einige Ausführungen der „Union-Elektrizitätsgesellschaft“, welche Anspruch darauf machen können, als besonders interessante Anlagen zu gelten. Fig. 61 veranschaulicht einen feststehenden Drehkran, welcher mit zwei wasserdichten Gleichstrommotoren ausgerüstet ist und dessen gesamte Bedienung durch einen Universalsteuerhebel erfolgt.

Wir wollen diese Beschreibung von Hebezeugen nicht schliessen, ohne den elektrisch betriebenen Vollportalkran zu erwähnen, welcher auf der Pariser Weltausstellung seitens der Firma „Mannheimer Maschinenfabrik Mohr & Federhaff“ ausgestellt war. Der Kran hatte eine Tragkraft von 3000 kg mit loser Rolle, von 1500 kg ohne Rolle, seine sonstigen Daten waren folgende: Ausladung 9,27 m, Rollenhöhe 14 m, Hubhöhe 20 m, Spur 4,4 m, Radstand 4,5 m.

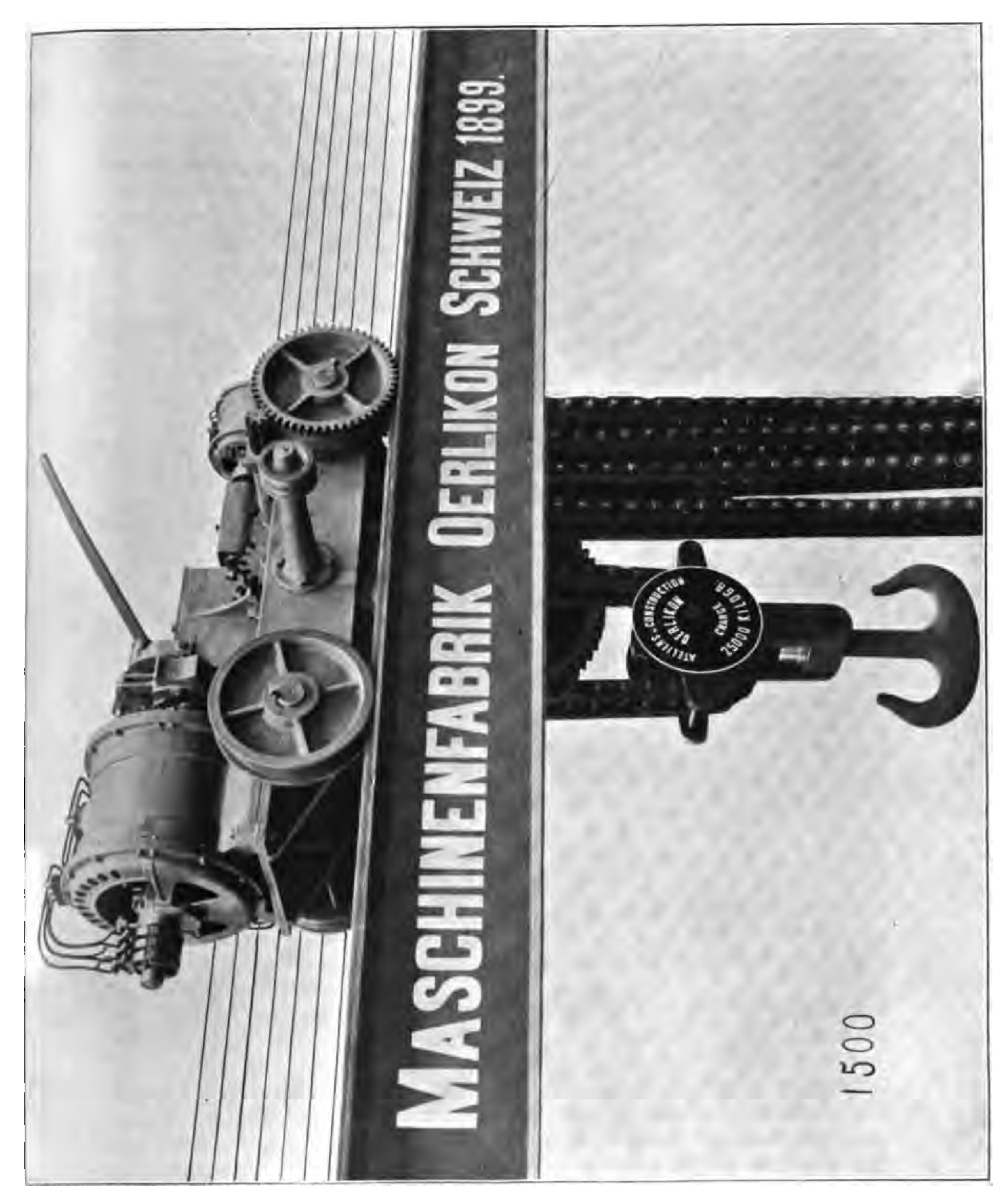



Fig. 57.

Zur Bedienung des Kranes waren zwei Motoren vorhanden, von denen der eine mit einer Leistung von 23 PS bei 570 Touren zum Betriebe des Hubwerkes, der andere mit $4^1/_2$ PS bei 940 Touren zum gemeinsamen Betrieb des Drehwerks und des Fahrwerks dienten. Der Antrieb geschah durch Drehstrom von 200 Volt Spannung und 6000 Polwechseln.

Die Stromzuführung war unterirdisch angeordnet in folgender Weise:

In einem ausgemauerten Kanal liegen die drei Zuleitungsschienen, isoliert an eisernen Quergestellen befestigt. Der ausgemauerte Kanal endet an der Pflasteroberfläche in einem schmalen Schlitz von 30 mm. An dem der Kanalseite zugewendeten Portalfuss des Kranes ist ein Gehäuse befestigt, aus welchem drei isolierte Kupferschienen in den Schlitz hinunterreichen, um dort mit ihren federnden Kontakten die Verbindung des Krans mit den drei Zuleitungsschienen herzustellen.

Die Fahrbewegung des Krans kann auf diese Weise ziemlich unbegrenzt ausgedehnt werden.

Von dem genannten am Portalfusse befestigten Gehäuse, in welchem ein dreifacher Sicherheitsausschalter sich befindet, nimmt die dreifache Leitung ihren Weg stets gut isoliert längs des Portales durch den Königsstock hindurch nach drei Schleifringen, welche an den Leitungen befestigt sind.

Von da wird der Strom durch Schleifbürsten, welche mit dem drehbaren Kranhaus verbunden sind, abgenommen und nach dem Schaltbrett geführt, von wo er sich über Sicherungen und dreipolige Ausschalter nach den Anlasswiderständen bezw. Motoren verzweigt.

Die Bedienung des Krans ist sehr einfach. Der Führer hat seinen Stand vorn am Kranhaus und kann die Operation des Krans vollkommen übersehen.

Mit einer Hand bedient er die Steuerung des Hubwerkes, mit der anderen den Anlasser für Dreh- oder Fahrwerk.

Die Konstruktion und Funktion des Hubanlassers ist folgende: Auf einer Marmorplatte, an einem Gehäuse befestigt, sind im Kreise Kohlenkontakte angebracht, welche in drei Abteilungen entsprechend den drei Phasen des Drehstroms zerfallen.

Von diesen Kontakten gehen Anschlüsse an den dreifachen Widerstand, welcher im Gehäuse untergebracht ist. Ist der Steuerhebel in seiner Mittelstellung, so ist der Strom vom Netz abgeschaltet und jede Bewegung des Krans durch mechanische Bremsen .gehindert. Zur Einleitung einer Hubbewegung des Krans wird der Steuerhebel zurückgelegt, dadurch die Motorankerbremse gelüftet und zugleich der Erregerstrom eingeführt. Durch weitere Bewegung des Hebels werden alsdann die eingeschalteten Anlasswiderstände der Reihe nach ausgeschaltet, sodass in gewissen Grenzen der Motor jede beliebige Geschwindigkeit bis zu seiner Normaltourenzahl anzunehmen vermag. Beim Abstellen der Hubbewegung wiederholen sich diese Anlasserfunktionen in umgekehrter Reihenfolge, sodass der Motoranker seine ganze lebendige Kraft noch zur Lasthebung abgeben kann, bis der Steuerhebel, in seine Mittelstellung gebracht, erst den Strom ganz abschaltet und dann die Ankerbremse freigiebt. Beim Senken der Last bleibt der Motor stehen; der Steuerhebel entkuppelt sich deshalb beim Vorlegen automatisch vom Anlasser, um lediglich die Bremse zu führen, was dadurch ausserordentlich zart geschehen kann. Ein ganz geringes Hakengewicht genügt schon, die Trommelachse abzudrehen, da Motor und Vorlegewelle

durch das Vorlegen des Steuerhebels abgekuppelt werden. Der Anlasser für Dreh- und Fahrwerk, ähnlich konstruiert wie der Hubanlasser, wird durch ein horizontales Handrad bedient und vermag dem Motor Strom für beide Umdrehungsrichtungen zuzuführen.

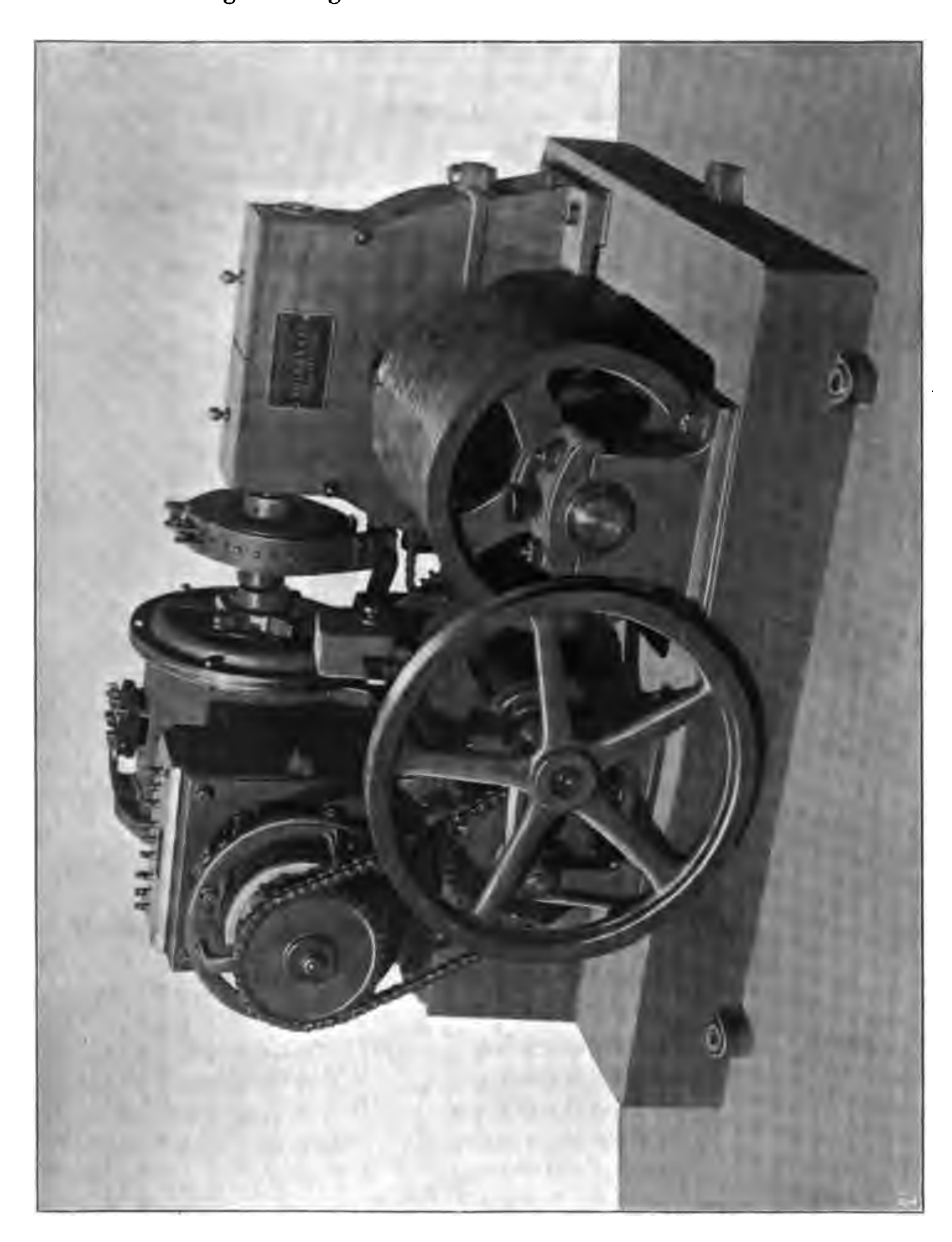


Fig. 58.

Ist das Handrad in seiner Mittelstellung, so ist auch hier der Strom vom Netz abgeschaltet und die Ankerbremse angezogen. Bei dessen Drehung nach rechts oder links wird die Ankerbremse gelüftet, der Strom eingeführt und bei weiterer Bewegung nach und nach die Widerstände ausgeschaltet, wobei sich die Kontaktrollen stets nur nach einer Richtung drehen. Da der

Strom abgeschaltet wird, ehe die Ankerbremse einfällt, so hat es der Führer ganz in der Hand, die lebendige Kraft des sich drehenden Krans bis zum gewünschten Stillstand voll auszunützen, wodurch wesentlich an Strom gespart wird. Die Drehrichtung des Handrades des Drehwerkes sowohl, als die Bewegung des Steuerhebels des Hubwerkes sind mit der Bewegung der Last in Übereinstimmung, sodass die Bedienung des Krans sehr einfach ist und falsche Griffe vermieden werden.

Das Hubwindwerk, dessen sämtliche Wellen in zwei gusseisernen Schildern gelagert sind, besteht aus Hubtrommel und doppelter Zahnradübersetzung. Das auf der Motorwelle aufgekeilte Trieb ist aus Rohhaut hergestellt und gewährleistet dem Windwerk, trotz der hohen Tourenzahl des Motors, einen stossfreien, elastischen, fast geräuschlosen Gang. Eine zweite Trommel, welche aus zwei Teilen von verschiedenem Durchmesser besteht, dient zur Aufnahme der Schliess- und Gegengewichtsseile, einer Vorrichtung,



Fig. 59.

welche die Fördergefässe respektive Excavatoren auf beliebiger Höhe öffnen und schliessen lässt.

Excavatoren (Selbstgreifer) haben den Vorteil, dass sie sich automatisch füllen, wenn es sich um Löschen oder Verladen von Kohlen, Erzen, Getreide u. s. w. handelt. Sie sind deshalb ausserordentlich leistungsfähig und sichern einen billigen ökonomischen Betrieb. Hub- und Entleerungsseil sind vierkant geflochten und bestehen aus bestem Patentpflugstahldraht. Die eigenartige Flechtung der Seile schliesst das so lästige Drehen gewöhnlicher Drahtseile aus. Um raschen Verschleiss derselben zu verhüten, sind die Trommeln und Rollen abgedreht genutet und in ihrem Durchmesser reichlich gross gehalten. Sämtliche Räder des Hubwerkes sind auf einer Spezialräderfräsmaschine gefräst, Trommel- und Vorgelegeachsen in Walzenlagern gelagert, sodass ein ausserordentlich hoher Nutzeffekt, somit geringster Stromverbrauch gewährleistet wird.

Auf der Achse des Motors sitzt eine selbstthätig wirkende Differentialbremse, welche ein Rückwärtsdrehen des Motors unmöglich macht und deshalb auch im Falle einer plötzlichen Stromunterbrechung ein Abstürzen der Last verhindert. Dieselbe ist vollständig unabhängig von der schon früher

erwähnten Ankerbremse, welche in direkter Verbindung mit dem Steuerhebel steht und zur Arretierung des in Bewegung befindlichen Motors dient.

Die Vorgelegewelle trägt eine der Firma gesetzlich geschützte Bremsbandkupplung (D. R. G. M. 21 339 und 78 183), durch welche beim Senken der Last die Trommel nebst ihrer ersten Übersetzung, wie schon oben bemerkt, vom übrigen Windwerk abgekuppelt wird.

Das kleine Triebrad auf der Vorgelegewelle, welches mit dem Zahnrad der Hubtrommelachse in Eingriff steht, ist mit der Bremsscheibe der Kupplung verbunden und läuft mit einer langen Büchse, aus Spezialbronze hergestellt, lose auf der Achse. Die Scheibe, welche das Bremsband mit seinem Stellzeug trägt, ist dagegen fest mit dieser Achse verkeilt. Durch ein Gewicht und eine auf der Vorlegeachse sitzende verschiebbare Muffe, die mit Hülfe von Lenkern und Hebel mit dem Bremsband verbunden ist, wird das

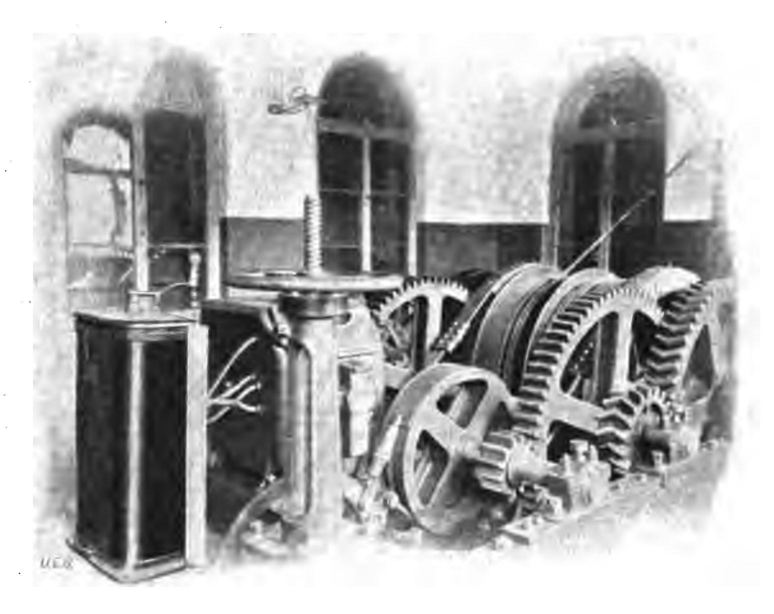


Fig. 60.

letztere fest angezogen, durch den Steuerhebel, wenn der Kranhaken abgelassen werden soll, aber gelöst.

Damit der Lasthaken nicht gegen die Auslegerrolle anlaufen kann, wird dessen Bewegung durch eine selbstthätig wirkende Vorrichtung, welche der Firma patentiert ist (D. R. P. 97 500), rechtzeitig begrenzt.

Durch ein Zahnräderpaar wird von der Trommelwelle aus eine Achse angetrieben, auf welche flaches Gewinde geschnitten ist. Eine durch ein Hängegewicht an der Drehung verhinderte Laufmutter schraubt sich auf dieser Spindel hin und her, während eine zweite Mutter fest auf der Spindel sitzt. Beide Muttern besitzen gegeneinander gekehrte Nasen, die sich treffen, wenn sich der Lasthaken der Rolle auf ein gewisses Mass genähert hat. Die bewegliche Mutter nimmt nun an der Drehung teil und ein an ihr befestigter Arm zieht mittels eines Kettchens den Steuerhebel auf seine Bremsstellung, um den Motor still zu setzen. Durch den patentierten Ausschaltungsmecha-

nismus ist dafür gesorgt, dass der Steuerhebel nicht über seine Bremsstellung hinaus bewegt werden kann und infolgedessen sich die Hubbremse lösen würde.

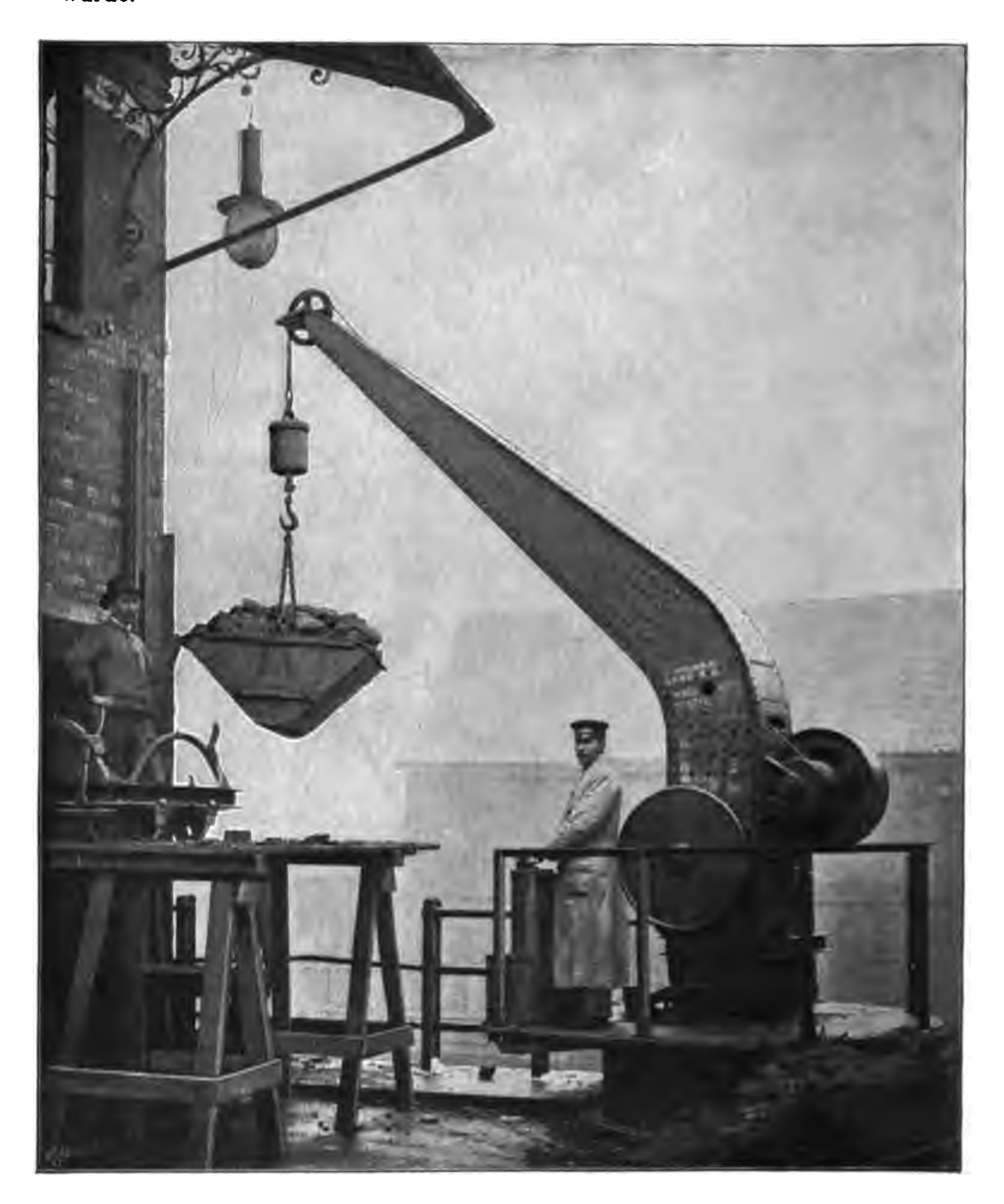


Fig. 61.

Die Bewegungen des Drehwerkes und Fahrwerkes werden von der verlängerten Motorwelle abgenommen; die Umschaltung für die eine oder andere Kranbewegung geschieht durch eine einfache Kupplung, welche von Hand bedient wird. Auf der Motorwelle selbst befindet sich ferner die elastische

Kupplung, welche zugleich als Bremsscheibe für die Ankerbremse des Dreh- resp. Fahrwerkes ausgebildet ist.

Das Drehwerk besitzt einen auf der verlängerten Motorwelle angebrachten zweigängigen aus Stahl hergestellten und gehärteten Wurm mit Stahlkugellagerung und ein dazu gehöriges gefrästes Wurmrad, welche in einem geschlossenen gusseisernen Gehäuse vollständig unter Öl laufen. Die Wurmradachse trägt an ihrem unteren Ende ein Gussstahltrieb, das an dem festliegenden Zahnkranz abrollt und die Drehung des Krans hervorbringt. Vier gussstählerne Laufräder, welche auf einem abgedrehten Stahlschienenkranz laufen, übertragen den Lastdruck auf das Portal.

Das Fahrwerk schliesst sich mittels Rohhauttriebes und gefrästem Stirnrad ebenfalls an die verlängerte Motorwelle an. Die Bewegung des Motors wird dann durch eine eingekapselte Wurmradübersetzung, deren Wurmradwelle durch den Königszapfen hindurchgeführt ist und einigen Wellen mit konischen Getrieben auf die gussstählernen Laufräder übertragen.

Die Zugänglichkeit des Krans ist durch Leitern am Portal und Schnabel, sowie durch eine auf dem Portal befindliche Plattform bequem gemacht.

Das Kranhaus ist solid aus genutetem Holz gefertigt und dessen Dach mit Zinkblech beschlagen. Die Durchgangsöffnung der Seile besitzt Schutzvorrichtungen, um das Eindringen von Regen und Schnee in das Innere des Gehäuses zu verhindern.

Elektrische Beleuchtung ist in Form von festen und transportablen Glühlampen vorgesehen.

Die Geschwindigkeiten der Kranbewegungen sind folgende:

Heben: 0,4 bezw. 0,8 m (Sekunde) je nach Anwendung der losen Rolle,
Drehen: 1,5 m (Sekunde) am Haken,
Fahren: 0,2 m (Sekunde).

Der Stromverbrauch eines Kranspiels, zusammengesetzt aus nachstehenden Bewegungen, ist zu circa 120 Wattstunden garantiert.

Heben von 1500 kg auf 10 m,
Drehen der Last um 180°,
Absetzen der Last um 2 m,
Heben des leeren Hakens um 2 m,
Zurückdrehen ohne Last um 180°,
Ablassen des leeren Hakens um 10 m.

Der Kran ist imstande 25 Kranspiele pro Stunde zu leisten; bei Anwendung eines Excavators von 1,75 cbm Inhalt, welcher etwa 1300 kg Kohlen fasst, können demnach bei zehnstündiger Arbeitszeit täglich circa 325 t Kohlen gefördert werden.

Die gesamte Kranordnung wird durch die beigefügte Schnittzeichnung (Fig. 62) in anschaulicher Weise wiedergegeben.

Das ganze Gebiet der elektrisch betriebenen Hebezeuge wie Kranen, Fahrstühle, Winden u. s. w. ist ein so umfangreiches, dass wir demselben uns im Rahmen dieses Buches nicht eingehend widmen können. Wir müssen deshalb wiederholt auf das grössere Spezialwerk verweisen, welches durch Dr. Niethammer, Oberingenieur der Union-Elektrizitätsgesellschaft, über diesen Gegenstand vor kurzem veröffentlicht worden ist. Nur einiges sei uns gestattet hier noch hervorzuheben.

Wir wollen, nachdem wir selbst uns eingehend über die Eigenschaften der Gleich- und Drehstrommotoren und über ihre verschiedenen Schaltungen verbreitet haben, nicht nochmals wiederholen, welche Bedingungen an einen guten Kranmotor oder Hebezeugmotor im allgemeinen gestellt werden müssen. Es geht dies aus der früheren Darlegung hervor. Bezüglich der Anordnung der Leitungen bei Laufkränen und sonstigen Hebezeugen sei ebenfalls auf NIETHAMMER verwiesen, welcher diese Gegenstände in längeren Abschnitten behandelt. Hierhin gehören auch die elektromagnetischen Bremsen, welche bei vielen Fahrstühlen und bei fast allen Kränen in Anwendung kommen.

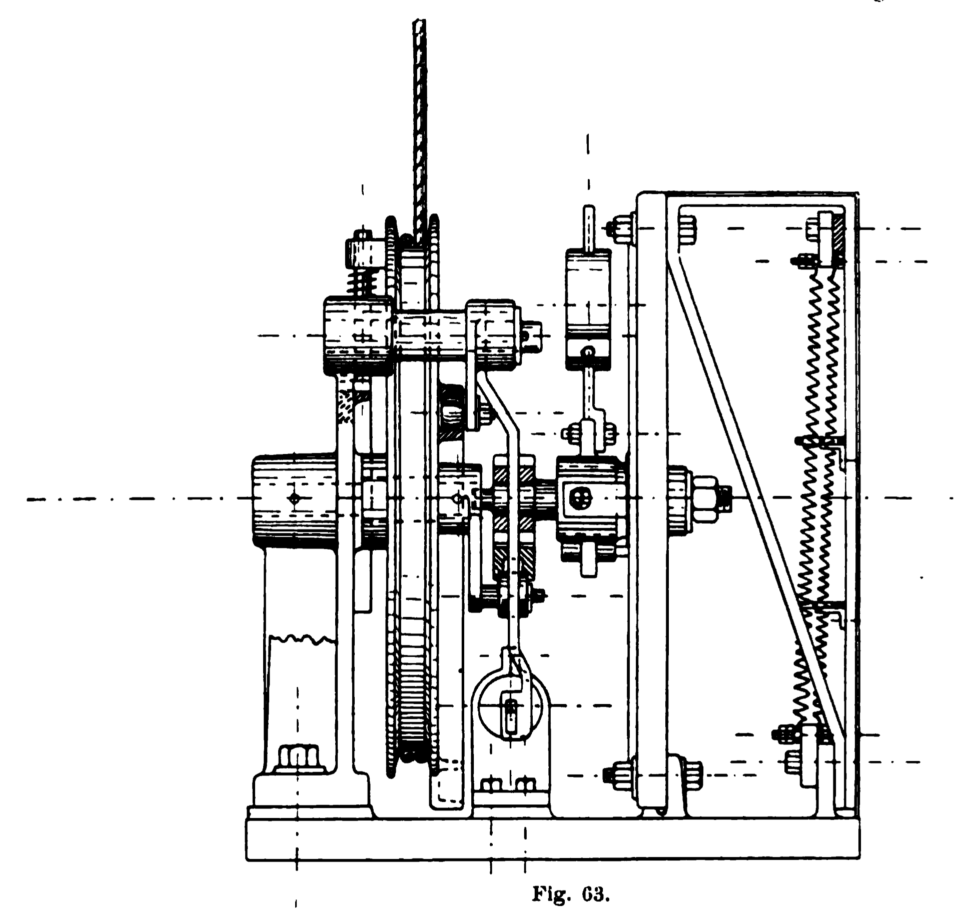
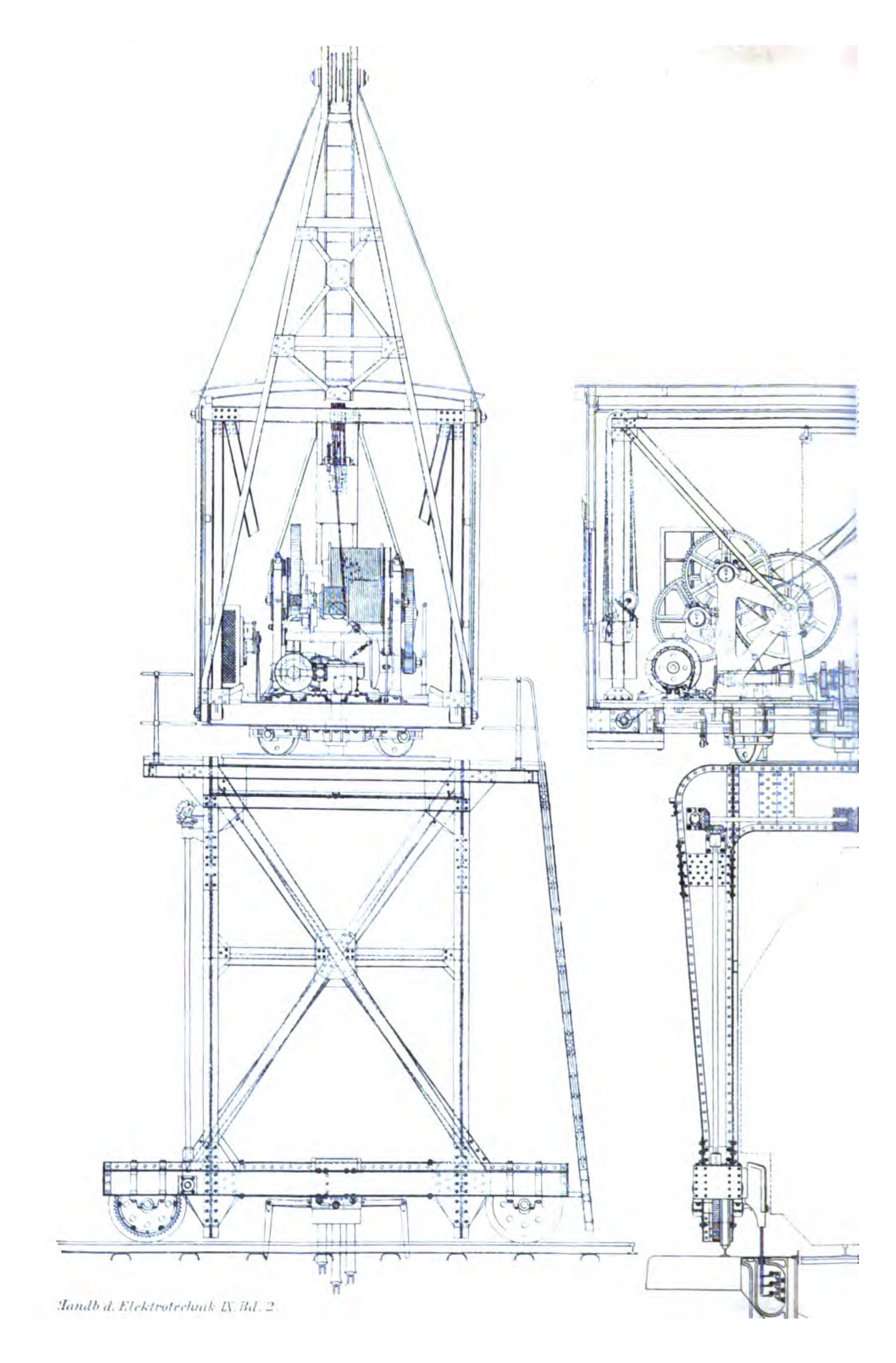
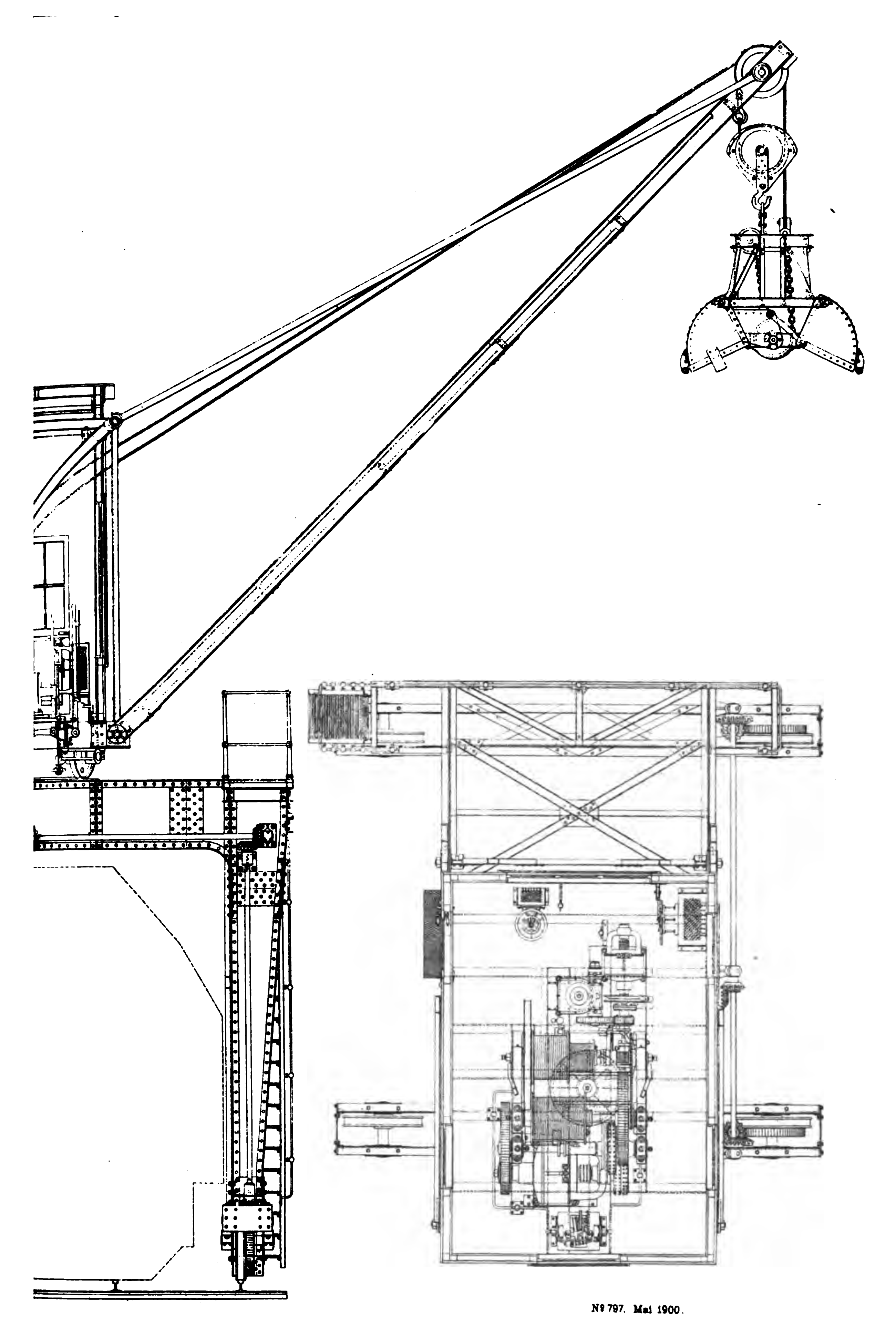


Fig. 63.

Ein besonderes Kapitel verdienen die bei einem Hebezeugbetriebe unentbehrlichen und in ihrer Konstruktion so ansserordentlich wichtigen Umkehranlasswiderstände. Die Konstruktion der älteren Firmen sind in dem oben erwähnten Handbuch über Generatoren, Motoren und Steuerapparate für elektrisch betriebene Hebezeuge eingehend beschrieben; es sei uns nur gestattet, an dieser Stelle eine jüngere Konstruktion, welche von Seiten des Verfassers für die Magdeburger Elektromotorenfabrik angegeben worden ist, zu beschreiben. Es handelt sich um einen automatisch wirkenden Umkehranlasswiderstand für elektrische Aufzüge.

Der auf Fig. 63, 64 und 65 veranschaulichte automatische Wendeanlasser hat den Zweck, durch eine nach oben oder unten gerichtete Seilbewegung


Handb. d. Elektrotechnik IX. Bd. 2.



Nº 797. Mai 1900.

*Verlag von S. Hirzel-Leipzig.*

von beiläufig 600 mm Hub den das Hebezeug antreibenden Gleichstrom- oder Drehstrommotor rechts- oder linksläufig in Thätigkeit zu versetzen unter den für eine regelrechte Wirkungsweise des Motors gegebenen Bedingungen, unabhängig von einer mehr oder minder mangelhaften Bedienung.

Der Apparat besteht aus einer Seilscheibe, welche aus der Mittelstellung „Halt" in zwei Endstellungen „Auf" und „Nieder" durch entsprechenden Zug am Seil bewegt wird. In allen drei Stellungen wird die Seilscheibe federnd eingeklinkt. An der Rückseite der Seilscheibe befindet sich eine Kulisse,

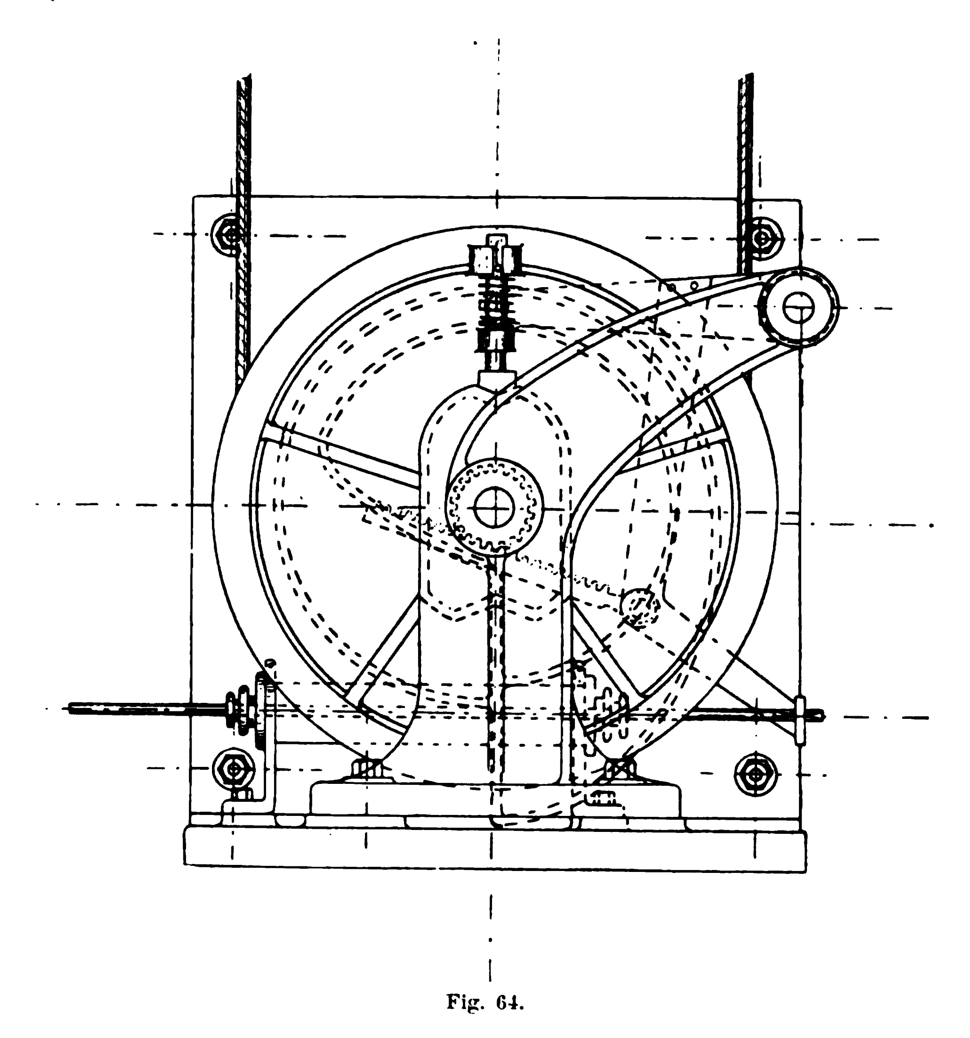


Fig. 64.

deren mittlerer Teil konzentrisch zur Drehachse der Seilrolle ist, während die Enden der Kulisse der Wirkungsweise entsprechend erweitert sind. Mittels der Kulisse wird ein Winkelhebel bewegt, an dessen senkrechten Arm eine Zahnstange und die Kolbenstange einer Glyzerinpumpe, welche auf die selbstthätige Wirkung des Apparates bremsend wirkt, angeschlossen ist. Die Zahnstange bewirkt mittels eines Zahnrades die Drehung des Schalthebels, der in seiner Mittelstellung horizontal steht, während vertikal nach oben an ihm ein an einem Hebelarm verstellbares Kippgewicht angebracht ist. Der Kolben der Glyzerinpumpe besteht aus zwei mit Löchern

versehenen Scheiben, deren eine mittels eines Zapfens in einer Nute der Cylinderwandung gleitet, während die andere fest auf der nicht drehbaren Kolbenstange sitzt. Der Pumpencylinder ist in seiner Lagerung drehbar. Durch Drehen des Cylinders um seine Achse können die Löcher der Kolbenscheiben, sich mehr oder weniger deckend, eingestellt werden, wodurch eine grössere oder geringere Bremsung erfolgt. Der Schalthebel besitzt Kontaktfedern aus hartem Kupferblech, welche sämtlich durch Kohlenkontakte unterstützt werden, wodurch ein Auftreten von Funken in jeder Schaltstellung unschädlich gemacht wird. Das Auftreten von Funken bei Ausschaltung der Motorspulen und des Ankerstromes wird gänzlich vermieden durch die eigenartige Schaltung, bei der sowohl Anker- als Spulenstrom bei Ausschaltung in sich geschlossen werden unter Einschaltung des gesamten Anlasswiderstandes. Auf der aus weissem Marmor bestehenden Schalttafel sind die überaus reichlich bemessenen Kontaktstücke für eine achtzehnstufige Einschaltung angeordnet, ebenso sind die hinter der Schalttafel an Marmor aufgehängten gegen seitliche Durchbiegung geschützten Widerstandsspiralen sehr reichlich bemessen, so dass eine Erhitzung der Drähte ausgeschlossen ist. Die Widerstandsspiralen sind geschützt durch ein leicht abnehmbares Gitterblechgehäuse, nach dessen Entfernung sämtliche Kontaktschrauben und Verbindungen leicht zugänglich und kontrollierbar sind.

Die Wirkungsweise des automatischen Wendeanlassers ist nun derart, dass nach circa 400 mm Hub des Seiles nach oben oder unten während des übrig bleibenden Hubs von 200 mm der horizontale Arm des Winkelhebels um ein gewisses Stück zwangsweise gehoben oder gesenkt wird, wodurch mittels Zahnstange und Zahnrad das Kippgewicht aus seiner senkrechten Mittelstellung ein Stück nach rechts oder links bewegt wird, der Kontakthebel hat inzwischen die Einschaltung des Motorstromes für Rechts- oder Linkslauf begonnen. Durch die Erweiterung der Kulisse in ihren Entstellungen ist der Winkelhebel sich selbst überlassen. Jetzt kann das Kippgewicht in der einen oder anderen Richtung, durch die Glyzerinpumpe gebremst, sich senken und so langsam den Vorschaltwiderstand ausschalten, bis der Motor schliesslich die volle Netzspannung erhält und mit voller Kraft arbeitet. — Durch Zurückbewegung der Seilscheibe in ihre Mittel- oder Haltstellung wird während eines Hubes von circa 400 mm das Kippgewicht allmählich entsprechend der Massenbeschleunigung gehoben und dabei der Widerstand wieder vorgeschaltet, nach dessen vollständiger Einschaltung sowohl Spulen, als Ankerstromkreis in sich geschlossen werden, wobei die Stromzuführung von aussen unterbrochen wird. — Die Wirkungsweise des Apparates für Drehstrommotoren ist dieselbe. Es gestaltet sich nur die Schalttafel etwas anders und zwar einfacher. Die leicht ersichtlichen Vorzüge bestehen zunächst darin, dass der mechanische Teil des Apparates gesondert montiert ist, wodurch ein Reissen am Seil nicht auf den Schaltapparat störend wirken kann. Ein weiterer Sicherheitsfaktor ist der grosse Seilhub, dessen letztes Drittel nur zur Einleitung der Schaltung benutzt wird; auch lässt die Verwendung einer entsprechend konstruierten Kurvenrolle in keiner Richtung eine Stosswirkung aufkommen. Die Verwendung überaus reichlich bemessener Kontaktflächen ist das Ergebnis langjähriger Betriebserfahrungen, ebenso wie die grosse Anzahl der Widerstandsabstufungen. Durch gleichmässige Dimensionierung und leichte Auswechselbarkeit der abnutzbaren Teile, verbunden mit leichter Zugänglichkeit, ist jede Störung

des Apparates an Ort und Stelle durch wenig geübte Leute schnell zu beseitigen.

Die doppelte Regulierfähigkeit der Einschaltung durch Verschiebung des Kippgewichtes auf seinem Hebelarm einerseits, sowie die Regulierbarkeit des Bremsapparates ermöglichen jede gewünschte Schnelligkeit des Einschaltens.

Neuerdings werden seitens der massgebenden Firmen des Fahrstuhlbaues Patente angemeldet über eine interessante Steuerung elektrischer Natur, durch welche es möglich ist, den Steuerapparat bei Beginn der Aufzugsthätigkeit so einzustellen, dass der Aufzugkorb bis zu einem gewünschten Stockwerk

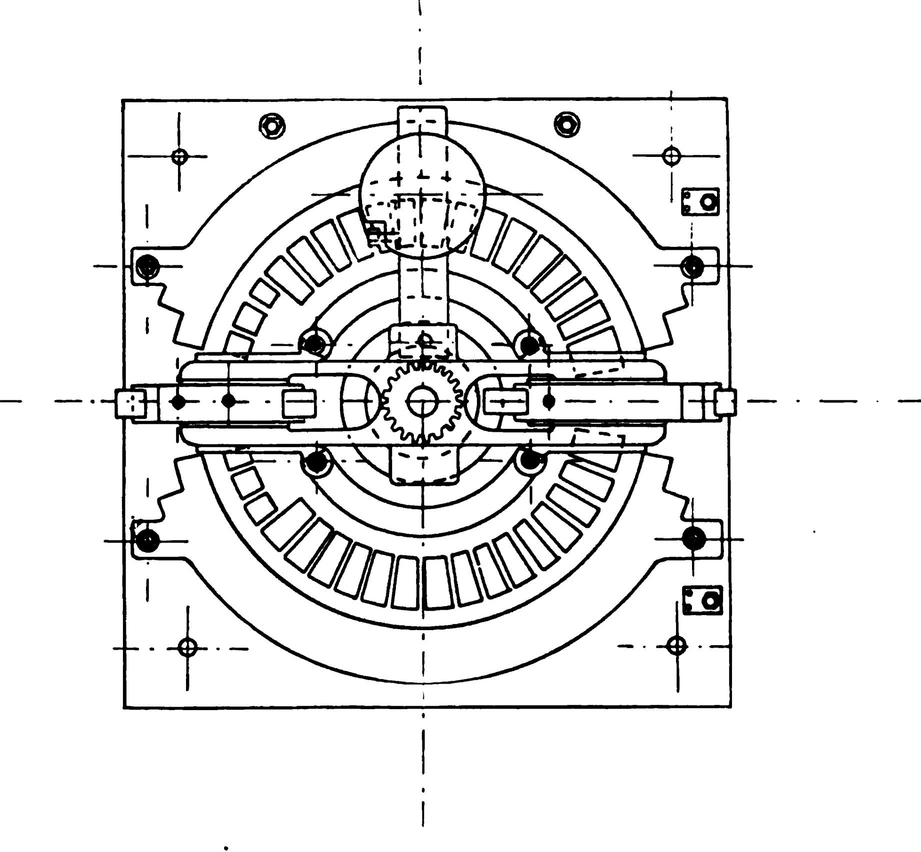


Fig. 65.

aufwärts oder abwärts fährt. Es ist allerdings zur Zeit über diese Patente der Firma Flohr in Berlin und der Berlin-Anhaltischen Maschinenbau-Aktiengesellschaft in Berlin-Dessau nichts bekannt.

Wir verlassen nunmehr das Gebiet der elektrisch angetriebenen Hebezeuge.

Eine ausgedehnte Verwendung hat der Elektromotor gefunden zum Antriebe von Werkzeugmaschinen. Wer hätte nicht die tadellos eingerichteten Werkstätten der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin mit ihrem Einzelantrieb sämtlicher Werkzeugmaschinen gesehen oder doch wenigstens eine Beschreibung davon gelesen. Diese Firma ist thatsächlich die erste

gewesen, welche in voll
Drehbänken, Fräsmasch
gesehen und für sich s
geneigt, den Gruppenan
einigte in der Werkstatt
trieb dieselben in der
digen Vorgelege von
Hauptwelle einen m
ersten Augenblick, a
antrieb, da vornehm

In vorzüglicher
O. Lasche der All
1900 der Zeitschri
welche den Vorzug
Frage stellen.

Dass überhau
Maschinenfabrik
dem sonst üblich
war schon seit J
anlage musste
Stelle zerstreut
aus elektrisch
Zeit in allen
Arbeitsmaschi
antrieb, die
Teile mit w
der bisherig
verhütung a
und der O
schnelligkei
trischer Ei
sich geger
wegen de
motoren
zunehmer
wiegend
würden.
Gruppe
Zusamm
hinfälli
punkt
Werks
Einric
gesag



Am meisten macht sich der Vorzug des Einzelantriebes bei besonderen Nachtarbeiten, wie sie in eiligen Fällen vorkommen können, bemerkbar, wo schliesslich es möglich ist, dass von einer ganzen Gruppe von Werkzeugmaschinen nur eine einzige oder zwei in Betrieb sind.

Freilich ist es nötig, bei der Bemessung der Elektromotoren für die anzutreibenden Werkzeugmaschinen recht vorsichtig zu sein, und auch darüber giebt Lasche in seiner Schrift zweckdienliche Angaben.

Bei dem grossen Interesse, welches namentlich in Fabrikantenkreisen die Frage des elektrischen Antriebes von Werkzeugmaschinen entgegengebracht wird, wollen wir nicht verfehlen, einige Hauptpunkte der Lasche-schen Schrift hier auszugsweise wiederzugeben.

Bei der Konstruktion der Kleinmotoren für Einzelantrieb ist ganz besonderer Wert auf geschlossenen Bau und auf die sonstigen Anforderungen des Einzelantriebes in elektrischer und mechanischer Richtung zu legen. Die, man möchte sagen, gepanzerte Form des Drehstrommotors, schützt den rotierenden Teil gegen mechanische Verletzungen und ermöglicht die Aufstellung an Plätzen, wo sonst besondere Schutzkasten nötig waren. Der Motor kann ohne weiteres seitlich an der Wand oder an der Decke befestigt werden, an Stellen, von denen aus sich die betreffende Arbeitsmaschine besonders günstig antreiben lässt und welche sonst unbenutzt blieben. Die Motoren werden für unmittelbare Kupplung mit der Arbeitsmaschine und für Riemenantrieb geliefert und zum bequemen Nachspannen des Riemens auf Stellschienen oder auf Riemenwippen montiert; weiter mit fliegend aufgesetzten Stufenscheiben versehen, um ohne weiteres Zwischenglied die Welle des Vorgeleges mit verschiedener Umlaufszahl zu betreiben. Dem Bedürfnis der Praxis nach langsam laufenden Kraftwellen wird Rechnung getragen, indem in die Fabrikation Riemen- und Zahnradvorgelege aufgenommen wurden, die mit den Motoren selbst zu einem Ganzen organisch verbunden sind.

Der Grundsatz, dass die Arbeitsmaschine von der Transmission unabhängig und nur mit Rücksicht auf den Fabrikationsgang angeordnet werden soll, und die Thatsache, dass eine stillstehende Bank keine Leerlaufarbeit erfordert, weil der Motor ausgeschaltet ist und tote Transmissionsstränge, die Licht und Kraft kosten, nicht vorhanden sind, kennzeichnen vornehmlich die Wirtschaftlichkeit des Einzelantriebes. Die für die Werkstätten hieraus entstehenden Vorteile müssen von allen Seiten als schwerwiegend anerkannt werden. Eine Berechnung des Nutzeffektes unter Berücksichtigung dieser zum teil eben unwägbaren Einflüsse lässt sich in Mark und Pfennig allgemein schlecht durchführen, vielmehr ist in jedem einzelnen Falle eine besondere Kritik notwendig.

Es muss neben der Betriebssicherheit in zweiter Linie ein hoher Nutzeffekt von den Kleinmotoren verlangt werden, und zwar nicht nur für volle Belastung, sondern besonders auch innerhalb weitester Grenzen darunter und darüber. Es ist ersichtlich, dass der Vorwurf, die Kleinmotoren hätten einen schlechten Nutzeffekt, heute nicht mehr gerechtfertigt ist; man weiss, dass es kaum einen Unterschied in der Ökonomie giebt, ob der Motor mit der halben normalen Last oder voll belastet oder aber um 50% überlastet läuft, welche Überlastung die Motoren ohne weiteres für $^1/_4$ bis $^1/_2$ Stunde aushalten. Wie wichtig und auch unerlässlich diese Eigenschaft bei Motoren für Einzelantrieb ist, wird erst dann klar, wenn man bedenkt, dass die Elektromotoren in der Praxis nur selten normal belastet sind, da es meistens nicht

Löchern, die in engen Ecken liegen, oder die durch Vorsprünge des Werkstückes verdeckt sind, ober beim Bohren auf ausgedehnten Flächen, wie Panzerplatten, Lokomotivrahmen, teilweise montierten Brücken- und Dachkonstruktionen. Man denke ferner an Arbeiten, bei denen eine Ortsveränderung ausgeschlossen ist, wie an die Montage grosser Maschinen fern von der Fabrik oder an den Bau von Schiffen, Bahngleisen, Brücken, Hallenbauten, Eisenkonstruktionen aller Art. Immer werden sich nachträgliche Arbeiten notwendig machen, die bisher durchgehend von Hand ausgeführt werden mussten. Nun ist heutzutage auf grossen Bauplätzen wohl immer eine elektrische Lichtanlage installiert, und öfter ist auch zur Kraftabgabe für Hebezeuge und Fördervorrichtungen oder für Pumpen und Gebläse Strom vorhanden. Man wird also in allen diesen Fällen mit dem grössten Nutzen und ohne weitere Unkosten transportable elektrische Bohrmaschinen u. s. w. verwenden können.

In anderer Weise können leicht transportable Werkzeuge bei der Massenfabrikation, Verwendung finden: Wenn auch das zu bearbeitende Stück weder zu gross noch zu schwer zum Transport ist, so wird es für viele Arbeiten doch billiger und bequemer sein, das Werkstück stehen zu lassen und das Werkzeug von Stück zu Stück zu bewegen. Es sei z. B. nur an das Bohren von Löchern für Anbringung von Firmenschildern, Klemmbrettern u. s. w. erinnert.

Nicht zu verkennen sind die Vorteile der elektrisch betriebenen transportablen Werkzeuge in Werkstätten, in denen gewisse Arbeiten nur selten vorkommen, wo sich demnach die Anschaffung besonderer feststehender Maschinen nicht lohnt. In Giessereien z. B., wo im gewöhnlichen Arbeitsgange Bohrarbeiten nicht notwendig sind, kann es sich unter besonderen Verhältnissen als zweckmässig erweisen, Gussköpfe gleich abzubohren oder andere Rohbearbeitungen vorzunehmen. Hier tritt wiederum der fahrbare Motor in seine Rechte, der mittels einer Anschlussdose auch in jede grössere Lichtleitung eingeschaltet werden kann.

Eine biegsame Welle oder Gelenkwelle vermittelt die Kraftübertragung, von der Motorwelle nach der leicht versetzbaren Arbeitsmaschine, dem Bohrapparat u. s. w.

Die von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gebauten transportabeln Bohrmaschinen mit elektrischem Antrieb wurden nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten konstruiert. In der einen Ausführung sollen sie als Universalbohrmaschinen zum Bohren von Löchern in beliebiger Richtung gebaut werden, wodurch bedingt ist, dass Motor und Bohreinrichtung getrennt werden. Das zweite Modell soll nur zum Bohren von Löchern in senkrechter Richtung dienen; Bohreinrichtung und Motor bilden ein organisches, leicht transportierbares Ganzes. Bei Bearbeitung von nicht oder nur schwer transportierbaren Werkstücken, bei Montage- und Reparaturarbeiten wird vorteilhaft die erste, auf der Werkbank und bei der Fabrikation von Massenartikeln die zweite Ausführung Verwendung finden.

Wir sehen also, dass die transportabeln Werkzeuge einmal Raum und Zeit besser auszunutzen gestatten, anderseits die „Arbeitsdichte“ erhöhen, da durch sie Grundstück und Einrichtungen intensiver beansprucht werden.

So weit die Ausführungen des Herrn Lasche; wir verlassen dieselben jetzt, um auch an den Konstruktionen anderer Fabriken die allgemein erkannte Bedeutung des Einzelantriebes zu zeigen; denn ausser der Allgemeinen

Elektrizitäts-Aktiengesellschaft haben auch eine ganze Reihe anderer Firmen auf dem Gebiete des elektrischen Antriebes von Werkzeugmaschinen Hervorragendes geleistet, wie z. B. die Maschinenfabrik OERLIKON, von deren Ausführungen wir einige hier im Bilde vorführen.

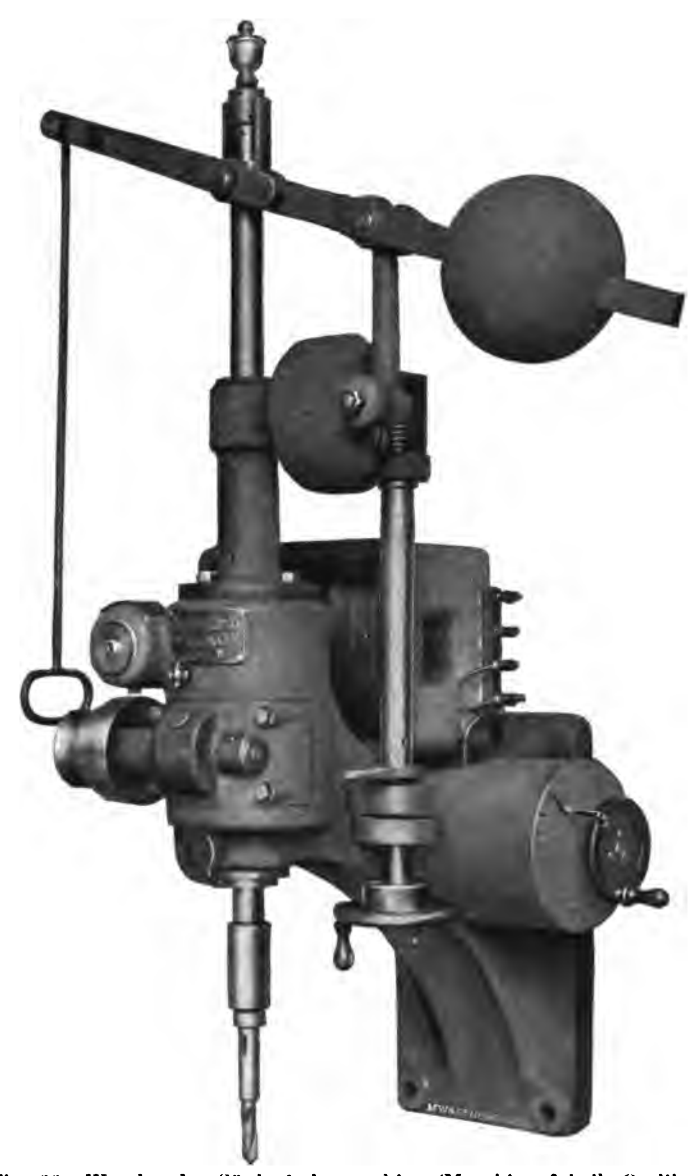


Fig. 66. Wand- oder Säulenbohrmaschine (Maschinenfabrik Oerlikon).

Fig. 66 zeigt z. B. eine Wand- oder Säulenbohrmaschine der genannten Firma, bei welcher der Motor, ein Gleichstrommotor, direkt angebaut ist. Die Ausführung muss in maschinentechnischer Hinsicht als ausserordentlich kompendiös und elegant bezeichnet werden, wozu auch die Anordnung des Anlasswiderstandes in Kontrollerform beiträgt.

Fig. 67 veranschaulicht eine Radialbohrmaschine mit elektrischem Antrieb derselben Firma. Es handelt sich hier um eine kleinere Werkzeugmaschine,

welche vornehmlich zum Bohren der Löcher in Marmor- und Schieferplatten benutzt wird; sie wird angetrieben durch einen kleinen Drehstrommotor.

Eine grössere Werkzeugmaschine, eine Horizontalbohr- und Fräsmaschine derselben Firma, zeigt Fig. 68. Hier ist es allerdings nicht zu vermeiden gewesen, einen Riemenantrieb als Zwischenglied zu benutzen. Der Antrieb



Fig. 67. Radialbohrmaschine (Maschinenfabrik Oerlikon).

geschieht auch hier wieder vermittels eines einfachen kleinen Drehstrommotors mit Kurzschlussanker. Der Motor ist direkt an den Ständer montiert, weshalb eine jede einzelne Maschine leicht als Ganzes transportiert und an beliebiger Stelle einer Werkstätte in Betrieb gesetzt werden kann. Der Motor dieser Maschine leistet 3 PS und wirkt, wie die Figur zeigt, mittels eines Riementriebes und eines vierstufigen Conus auf ein Schneckengetriebe.

Der Vor- und Rückwärtsgang wird durch einen Polumschalter, durch den zwei Drähte der Ständerzuführung vertauscht werden, bewirkt.

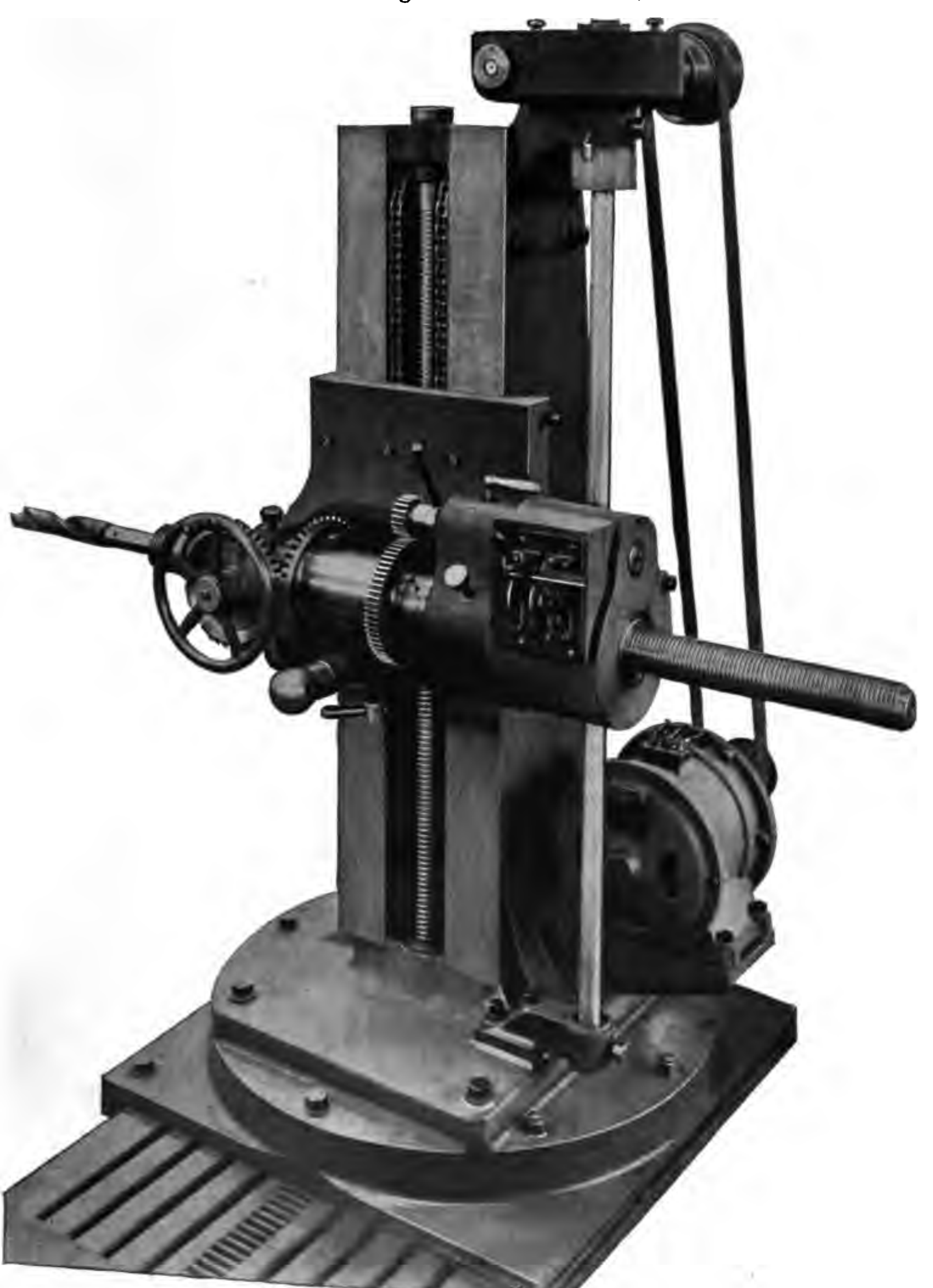


Fig. 68. Horizontalbohr- und Fräsmaschine (Maschinenfabrik Oerlikon).

Eine interessante Konstruktion einer doppelten Bohrmaschine zeigt Fig. 69. Auch diese Maschine rührt von der Maschinenfabrik OERLIKON her. Der Antrieb geschieht durch Gleichstrommotor.

Eine glückliche Lösung für die öfter auftauchende Frage, eine vorhandene Drehbank oder Werkzeugmaschine so umzuändern, dass sie mittels Elektromotors angetrieben werden kann, wird in Fig. 70 verdeutlicht. Wir sehen hier ein Elektromotorvorgelege, d. h. einen Elektromotor, welcher mittels



Fig. 69. Doppelte Bohrmaschine (Maschinenfabrik Oerlikon).

Schnecke und Schneckenrad die übliche Stufenscheibe, welche sonst auf dem Vorgelege einer Werkzeugmaschine angebracht ist, in Thätigkeit bringt. Auf diese Weise können ohne grosse Kosten vorhandene Werkstätten für den Einzelbetrieb umgebaut werden, wobei allerdings immerhin der Hauptvorzug des Antriebes, das Fehlen eines jeden Riemens in der Werkstatt, noch nicht erfüllt ist.

Fig. 71 zeigt eine Ausführung der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft Helios in Köln-Ehrenfeld. Die Figur stellt eine der schwersten Walzendrehbänke dar, welch' letztere durch einen Gleichstrommotor mit Nebenschlusswicklung

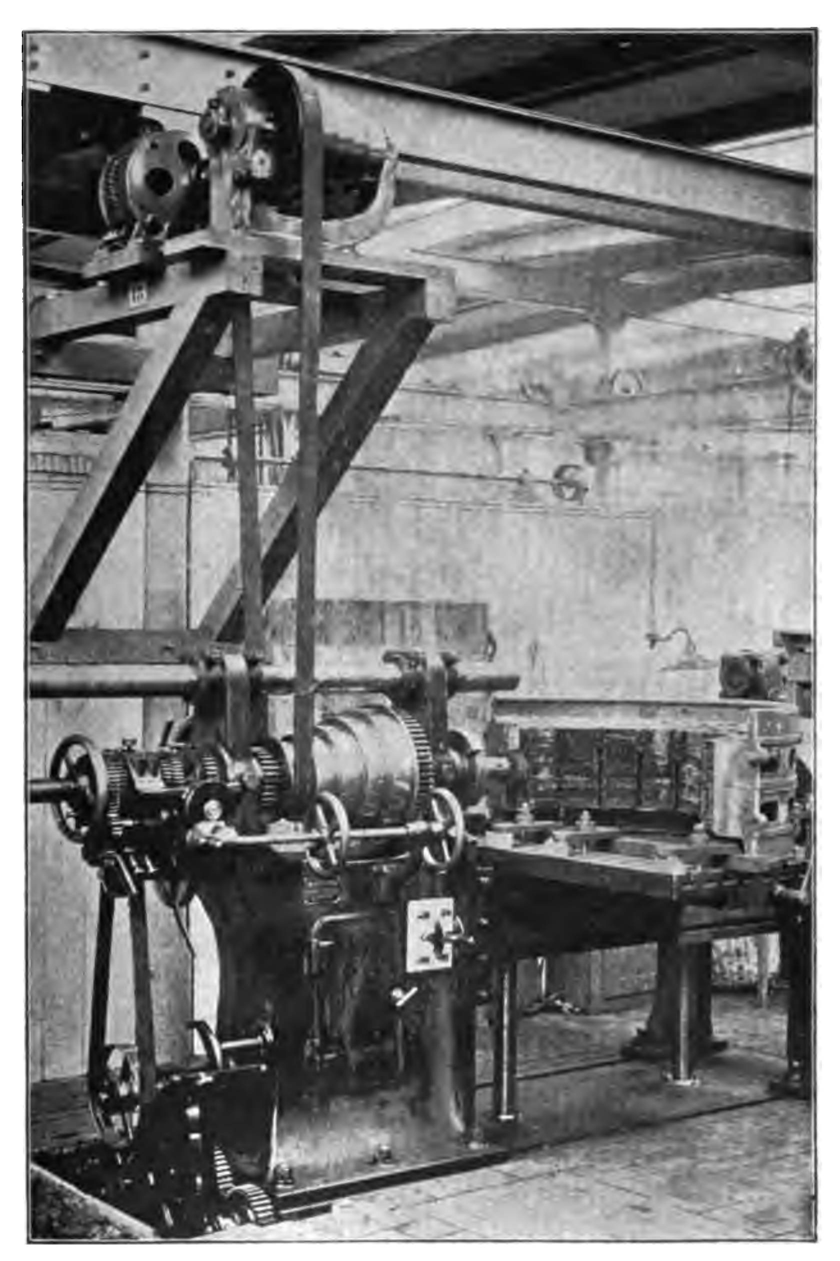


Fig. 70. Drehbank oder Werkzeugmaschine mit Elektromotor (Maschinenfabrik Oerlikon).

von 30 PS angetrieben wird. Man beachtet an dem Motor die Ausführung mit zwei Kollektoren, welche nach dem von uns in dem Kapitel über Gleichstrommotoren und ihre Tourenregulierung Gesagten sofort verständlich ist. Es handelt sich hier um eine doppelte Ankerwicklung zum Hintereinander-

schalten und Parallelschalten, wodurch verschiedene Tourenzahlen der Drehbank erreicht werden können.



Fig. 71.

Der Antrieb einer Magnetspulenwickelmaschine durch Drehstrommotor zeigt Fig. 72; die Ausführung des elektrischen Teiles dieser Maschine rührt von der Firma Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Kolben & Co., Prag,

her. Diese Friktionsantriebe bewähren sich für kleine Kräfte ausserordentlich gut und haben noch den ungeheuren Vorzug, dass man in beliebiger Weise durch Verschieben des kleinen Rades auf dem grossen die Tourenzahl der Werkzeugmaschine beziehungsweise der Spindel zu ändern in der Lage ist.

Eine ganz besondere Verwendung haben die Elektromotoren in der Form als fahrbare Bohrmaschinen gefunden, und fast alle grösseren Firmen haben



Fig. 72.

auf diesem Gebiete ihre besonderen Konstruktionen herausgebracht. Es ist leicht einzusehen, dass derartige transportable Bohrmaschinen sich zur Bearbeitung schwerer Werkstücke, welch' letztere man ungern transportiert, innerhalb und ausserhalb von Fabrikwerkstätten auf Schiffswerften, bei Brückenbauten und bei der Ausführung grosser Eisenkonstruktionen sich als sehr nützliches Werkzeug erweisen werden. Da derartige Maschinen häufig im Freien arbeiten müssen, so ist eine wasser- und staubdichte Einkapselung

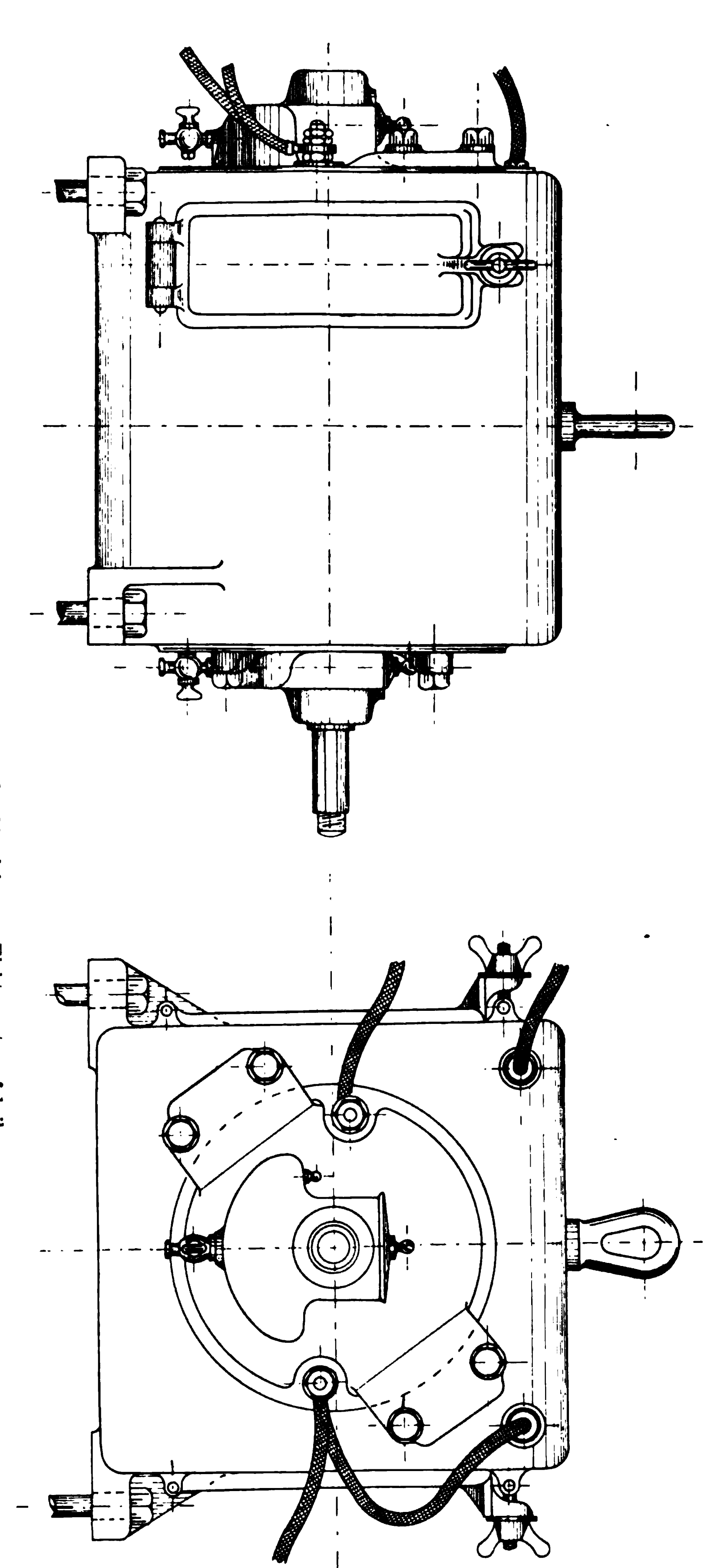


Fig. 73. Eingekapselter Motor der Magdeburger Elektromotorenfabrik.

Fig. 74. Kapselmotor mit Vorgelege der Magdeburger Elektromotorenfabrik.

des Elektromotors, wenn auch nicht unbedingt nötig, so doch vorzuziehen (Fig. 73). Die Elektromotoren werden gewöhnlich für höhere Tourenzahlen ausgeführt, im Durchschnitt für 1500 Touren. Sie haben Leistungen von 1 bis 2 PS; auch werden für kleine Bohrleistungen sehr kleine Kräfte benutzt.

Die hohe Tourenzahl wird bei allen Firmen (Fig. 74) vermittels eines Zahnradvorgeleges, welches direkt am Motor angebracht ist, etwa im Verhältnis 1:8 vermindert; von der Zahnradvorgelegewelle wird entweder durch ausziehbare Welle mit Universalgelenken oder durch eine biegsame Welle die Bohrvorrichtung angetrieben.

Auf dem fahrbaren Karren ist alles vereinigt, was für den Betrieb des Elektromotors notwendig ist; in erster Linie ein ebenfalls eingekapselter Anlasswiderstand; der möglichst als Umkehranlasser auszuführen ist, um ausser

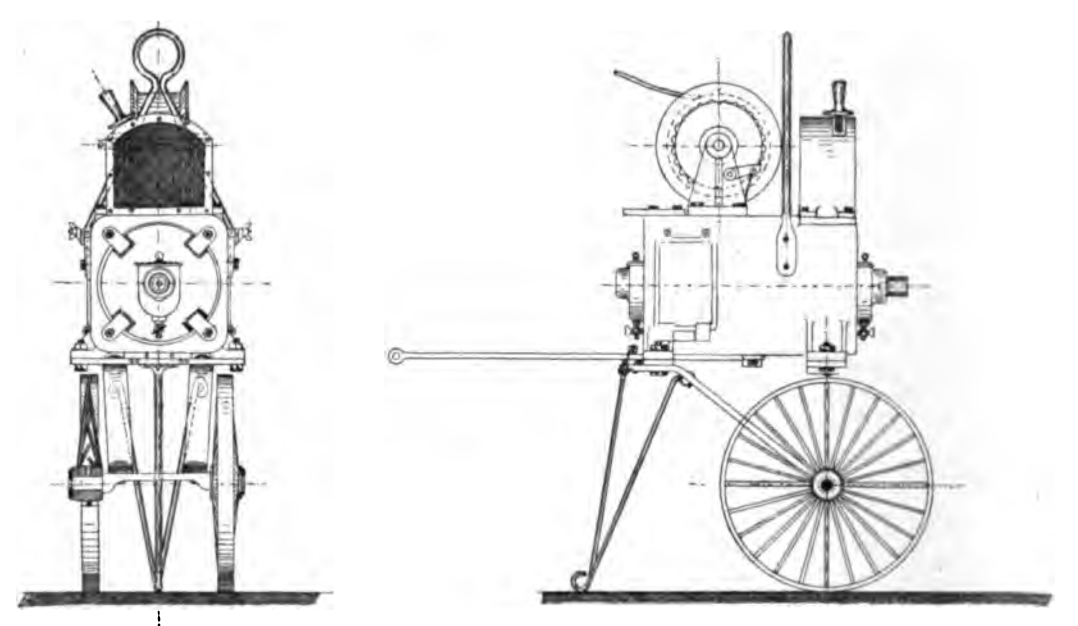


Fig. 75.

dem Bogen auch das Gewindeschneiden ausführen zu können. Ferner sind Bleisicherungen sowie ein Ausschalter und schliesslich eine Kabeltrommel mit der notwendigen Leitung vorhanden, um an beliebigen Punkten der Werkstatt oder im Freien an eine vorhandene Leitung anschliessen zu können.

Von diesen beschriebenen fahrbaren Bohrmaschinen (Fig. 75) mit hoher Tourenzahl abweichend ist eine Konstruktion der Magdeburger Elektromotorenfabrik, welche zur Vermeidung des Zahnradvorgeleges den Motor selbst für 400 Touren ausführt. Die Leistung des Motors ist $2^1/_2$ PS normal, während der Motor sich auf 4 PS momentan überlasten lässt, ohne eine Funkenbildung zu zeigen. Diese Leistungen sind notwendig bei forciertem Betriebe.

Die Fortlassung des Zahnradvorgeleges geschah nach reiflicher Überlegung und dem Einvernehmen mit einer der ersten Firmen des Lokomobilbaues, für welche mehrere derartige transportable Bohrmaschinen geliefert wurden. Die Figur veranschaulicht sowohl im Schnitt als auch in der Ansicht die Ausführung dieser vom Verfasser entworfenen Konstruktion.

Von der Besprechung der transportablen Bohrmaschinen kommen wir auf die Ausführung von Gesteinbohrmaschinen.

## A. Stossbohrmaschinen.

Der ausgedehnte Gebrauch der elektrischen Betriebskraft für Bergwerkszwecke hat den Wunsch gezeitigt, den elektrischen Strom auch für die Gesteinbohrungen aller Art zu verwenden.

Für das Bohren von Gestein, unter welchem wir das Bohren von Sprenglöchern etc. verstehen, kam bei maschinellem Betrieb bis vor wenigen Jahren die Druckluft als Betriebskraft fast allein in Frage. Für weicheres Gestein verwendet man schon längere Zeit elektrische Gesteinsbohrer mit rotierendem Bohrstahl und zwar für Kohle, Salz, Schiefer etc. mit vorzüglichem Erfolge.

Bei ganz hartem Gestein jedoch sind rotierende Gesteinsbohrer mit Vorteil nicht zu verwenden, da hierfür ein sehr langsamer Gang des Bohrers, grosser Druck und schwere Konstruktion, schliesslich besondere Bohrstähle erforderlich sind. Gerade der letztere Umstand ist es, welcher der Einführung der rotierenden Bohrer für hartes Gestein entgegensteht, da es besonders wertvoll erscheint, dass die Bohrstähle an Ort und Stelle angefertigt und geschärft werden können.

Die Anforderungen, die an einen Gesteinsbohrer für Gruben-, Tunnel- und Steinbrucharbeiten gestellt werden müssen, sind im wesentlichen folgende:

Einfache und starke Konstruktion, Widerstandsfähigkeit gegen Wasser und säurehaltige Luft und nicht zum geringsten gegen eine gewisse rauhe Behandlung seitens des Bergmannes, einfache Hantierung, geringer Raumbedarf, kleines Gewicht und leichte Transportfähigkeit, geringe Abnutzung und dadurch bedingte geringe Reparatur.

Nach jahrelanger Arbeit ist es der Union Elektrizitäts-Gesellschaft gelungen, einen Gesteinsbohrer für elektrischen Betrieb zu bauen, welcher alle oben genannten Bedingungen erfüllt. Seine Erfindung beruht auf der praktischen Nutzbarmachung des Prinzips der Erregung von Solenoiden mit pulsierenden Wechselströmen mittels einer patentierten Spezialdynamo, wodurch einem zwischen Solenoiden schwebenden Eisenkern eine hin- und hergehende Bewegung erteilt wird. In der Hauptsache besteht diese Stossbohrmaschine aus zwei nebeneinanderliegenden, magnetisierenden Spulen, die von einem eisernen Rohr umschlossen werden und in deren Innern ein cylindrischer Eisenkern hin- und herbewegt wird. Nach vorn ist der Hub der Maschine lediglich durch das Aufschlagen des Meissels gegen das Gestein begrenzt, sodass der Kolben in dieser Richtung aus der Maschine herausgezogen werden kann, der Rückschlag wird von einer Spiralfeder aufgefangen und teilweise für den Vorwärtsschlag wieder nutzbar gemacht. Durch besondere Verschlussstücke sind die Spulen vollkommen dicht abgedeckt. Die Stossbohrmaschine gestattet ein Bohren nach allen Richtungen mit gleich günstigem Erfolge.

Die normale Type hat einschliesslich des vorstehenden Bohrkopfes eine Länge von 1150 mm, einen Durchmesser von 125 mm und wiegt samt Schlitten circa 106 kg. Als Bohrer können entweder Kreuz- oder Z-Bohrer, mehrkantige oder gewöhnliche runde Meisselbohrer benutzt werden. Die Durchmesser der zu bohrenden Löcher schwanken zwischen 24 und 65 mm.

Die Betriebsresultate einer von der Union-Elektrizitätsgesellschaft für den Erzherzoglich-Friedrichschen Eisensteinbergbau in Bindt vor einigen Jahren gelieferten elektrischen Stossbohranlage sind in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

| Art des Gesteins | Zahl der | | Leistung in 10 Minuten | |
|---|---|---|---|---|
| | Bohrlöcher | Bohrlochtiefen in mm | reiner Bohrzeit in cm | ganzer Bohrzeit in cm |
| Spateisenstein, sehr fester Gang . . | 6249 | 4501,19 | 44,13 | 14,20 |
| Spateisenstein, fester Gang . . . . | 2021 | 1455,96 | 45,78 | 15,96 |
| Sehr fester quarzreicher Schiefer . | 2081 | 1393,87 | 46,46 | 14,84 |
| Fester Schiefer . . . . . . . . | 3768 | 2805,00 | 53,57 | 17,60 |
| Milder Gang und Schiefer . . . . | 3489 | 2883,93 | 75,14 | 21,76 |

Die für die Bohrdynamo erforderliche Betriebskraft schwankt je nach der Zahl der eingeschalteten Bohrmaschinen. Bei wachsender Belastung steigt der Wirkungsgrad des Generators, sodass zum Antriebe einer Bohrdynamo für sechs Bohrer beim Einschalten von:

1 Bohrer 4,68 PS, also 4,68 PS pro Bohrmaschine
2 „ 8,15 „ „ 4,08 „ „ „
3 „ 11,68 „ „ 3,89 „ „ „ u. s. w.

erforderlich sind, wenn die Bohrmaschinen durch nicht zu lange Leitungen mit der Dynamo verbunden sind und die Spannung des die Bohrer speisenden Wechselstroms 111 Volt beträgt. Bei langen Leitungen wird etwas mehr Energie zur Überwindung des Leitungswiderstandes erforderlich sein.

Der Kraftverbrauch einer Luftbohrmaschine gleicher Leistung beträgt 6 bis 10 PS.

Der Kraftverbrauch der elektrischen Stossbohrmaschine bleibt mithin weit hinter dem Kraftverbrauch der Luftbohrmaschine zurück. Der Gesteinsbohrer der Union-Elektrizitätsgesellschaft kann sowohl für Gruben- und Tunnelarbeiten, als auch für den Tagbau verwendet werden.

Die Stromzuleitung für die Bohrer erfolgt in der Weise, dass die Hauptleitungsdrähte etwa 30 m bis vor Ort geführt werden und hier wird dann ein biegsames Kabel mit einer Anschlussdose zum Anschluss durch eine Verteilungstafel an die Bohrmaschine abgezweigt. Im Schacht verlegt man unter Umständen bleiarmierte Kabel, während auf den Strecken blanke Leitungen verwendet werden.

Zum Betriebe der Stossbohrer der Union-Elektrizitätsgesellschaft ist eine besondere Dynamomaschine erforderlich, welche ausser Gleichstrom noch Wechselstrom von geringerer Periodenzahl liefert, die Grösse der Bohrdynamo richtet sich nach der Anzahl der gleichzeitig zu betreibenden Bohrer. Ein wesentlicher Vorteil dieser Spezialdynamos ist, dass neben dem Wechselstrom für den Betrieb der Stossbohrer auch Gleichstrom für Licht- oder anderweitige Kraftzwecke von derselben abgenommen werden kann. Hiernach braucht auch die Maschine keine besondere Erregung von aussen.

B. Drehbohrmaschinen.

Zum Bohren in weichem Gestein fabriziert die Union-Elektrizitätsgesellschaft Drehbohrmaschinen, bei welchem durch ein einfaches Rädervorgelege die Bohrspindel direkt vom Elektromotor, der infolge seiner gedrungenen Bauart und seines geringen Gewichtes direkt an der Spannsäule zu befestigen ist, angetrieben wird.

Der Motor besitzt ein vollkommen geschlossenes Magnetgehäuse, ist somit gegen Staub und Feuchtigkeit durchaus geschützt.

Der Antrieb der Bohrspindel erfolgt, indem von der Motorankerwelle aus nicht nur die Bohrspindel selbst, sondern auch die Spindelmutter angetrieben wird; es lässt sich hierdurch eine grössere Regulierung zwischen Vorschub und Umdrehungszahl des Bohrers erreichen, wobei noch zu berücksichtigen ist, dass das Gewinde der Spindel und Mutter sehr stark und haltbar ausgeführt werden kann. Der Vorschub der Bohrspindel kann entsprechend der Härte des zu bohrenden Gesteins geändert werden, und geschieht dies in der Weise, dass entweder für den Antrieb der Spindelmutter oder der Spindel selbst andere Übersetzungsverhältnisse gewählt werden. Bei der normalen Type beträgt der Vorschub circa 600 mm pro Minute. Dieser Drehbohrer wird in zwei Typen ausgeführt, und zwar Type MPT mit Telleransatz für Einfach-Schraubenspannsäule und Type MPD für Doppel-Schraubenspannsäule; die Leistung beider Typen beträgt 2 bis 2,5 PS bei circa 2000 Touren des Motors. Das Gewicht beträgt circa 70 kg.

Der Durchmesser der zu bohrenden Löcher schwankt zwischen 25 und 40 mm.

Der Strom für die Bohrmaschine kann von jeder vorhandenen Kraft- oder Lichtleitung für Gleichstrom oder Drehstrom von 110, 220 oder 500 Volt Spannung abgezweigt werden, und gestattet die Konstruktion des Bohrers, sowie seine Befestigung an der Bohrsäule das Bohren in jeder beliebigen Richtung.

Ausserordentlich umfangreiche Studien auf dem Gebiete der Verwendung elektrischer Bohrmaschinen in Bergwerken hat auch die Firma Siemens & Halske, Berlin, gemacht. Die Ausführungen dieser Firma stehen indessen, gerade was Stossbohrer anbetrifft, im Gegensatz zu den Konstruktionen, welche wir eben betrachtet haben. Allerdings hatte schon Werner von Siemens in richtiger Erkenntnis der Wichtigkeit eines elektrisch betriebenen Stossbohrers für Bergwerkszwecke einen derartigen Apparat mit hin- und hergehender Bewegung, eine sogenannte Solenoidmaschine, im Jahre 1879 erfunden, worüber eine Patentschrift vom 22. Oktober 1879 handelt. Bei dieser Solenoidmaschine schleudern mehrere abwechselnd magnetisierte Solenoide einen innerhalb derselben befindlichen Eisenkern hin und her. Es sind drei Solenoide vorhanden, von welchen die beiden äusseren durch Wechselstrom nach jeder halben Periode umpolarisiert werden, während der mittleren Spule durch Gleichstrom eine dauernde Polarität erteilt wird. Es ist daher leicht einzusehen, wie zufolge dieser Anordnung das Maximum des Magnetismus in der Maschine hin und her wandern und den Eisenkern mitnehmen muss. Die Firma ist indessen im Gegensatz zur Union-Elektrizitätsgesellschaft, welche gerade diese Ausführung der Solenoidmaschinen zu hoher Vollkommenheit gebracht hat, sehr bald von dieser Konstruktion abgegangen und hat sich durch verschiedene Nachteile des Solenoidprinzips veranlasst gesehen,

eine vollkommnere Konstruktion zu suchen. SIEMENS & HALSKE entschlossen sich daher, einen rotierenden Elektromotor zum Antrieb einer mechanischen Stossbohrmaschine zu verwenden, mit anderen Worten, sie führte die eigentliche Arbeitsmaschine mechanisch und nur ihren Antrieb elektrisch aus. Die Stossbohrmaschine ist nach dem Prinzip des Federhammers gebaut. Der Stoss des Meissels auf das Gestein erfolgt nach oben wie nach unten mit nahezu gleicher Stärke; Stösse innerhalb des Mechanismus können nicht eintreten, da die arbeitenden Teile dauernd miteinander in Berührung bleiben. Die Maschine kann daher auch leer laufen; ferner kann man sie so fest gegen das Gestein vorschieben, dass der Kolben an jeder Bewegung verhindert wird; es kann auch der Bohrer im Bohrloch stecken bleiben: der Antriebsmechanismus wird hiervon nicht beeinflusst; die Maschine läuft vielmehr in gleichmässig ruhiger Weise weiter, gleichgültig ob der Bohrer das Gestein überhaupt nicht trifft oder ob er im Gegensatz dazu festgehalten wird. Die Maschine hat eine sehr hohe Rückzugskraft bei Klemmungen im Bohrloch, sodass solche Klemmungen verhältnismässig selten den Stillstand des Bohrers veranlassen. Die Maschine arbeitet mit hoher Schlagzahl (420 bis 450 pro Minute). Der Motor ist mit der Maschine durch eine biegsame Welle verbunden, während er selbst in einem Motorkasten mit dem zugehörigen Rädervorgelege, dem Anlasswiderstand und den Bleisicherungen zusammen untergebracht ist. Ferner gehört zu dem ganzen System naturgemäss eine Kabeltrommel mit aufgewickeltem Kabel zum Anschluss an die vorhandenen Starkstromleitungen.

Naturgemäss können der Motor und die übrigen Antriebsgeräte in derselben Weise mittels biegsamer Welle verbunden werden mit einem rotierenden Bohrapparate; es ist deshalb bei der Firma SIEMENS & HALSKE in den Antriebsgeräten keinerlei Unterschied zwischen der Verwendung für Stossbohrer und für rotierende Bohrer.

Wir verweisen bezüglich verschiedener Einzelheiten auf die ausserordentlich eingehend geschriebenen Nachrichten von SIEMENS & HALSKE, Jahrgang 1900, No. 31—34.

Es sei uns gestattet, noch einige Gebiete der elektrischen Arbeitsübertragung kurz zu streifen.

In ausgedehntem Masse scheint dem Elektromotor ein Arbeitsfeld in den Webereien und Spinnereien vorbehalten zu sein.

Während man auf der einen Seite viele Firmen, wie zum Beispiel die Allgemeine Elektrizitätsgesellscsaft, die Firma SIEMENS & HALSKE, den Antrieb jedes einzelnen Webstuhles durch Elektromotor befürwortet und zwar derart, dass der Motor meistens in seiner Ausführung als kleiner Drehstrommotor mittels Zahnradvorgelege an den Webstuhl angebaut wird, ziehen andere Firmen, wie zum Beispiel BROWN, BOVERI & Co. den Gruppenantrieb in Webereien bezw. den Antrieb durch Riemen vor.

Es wird in jedem Falle natürlich auf die örtlichen Verhältnisse und auf die Arbeitsdichte ankommen, da sehr wohl in dem einem Falle durch Einzelantrieb die Betriebskraft zu teuer werden kann, während in anderen Fällen durch den Gruppenantrieb starke Verluste entstehen können.

Ein eigenartiges, für die elektrische Kraftübertragung ausserordentlich aussichtsreiches Feld bietet die Landwirtschaft. Auch auf diesem Gebiete ist die Elektrizität kein Fremdling mehr, seitdem auf einer ganzen Anzahl grösserer Güter und Wirtschaften der elektrische Betrieb eingeführt ist.

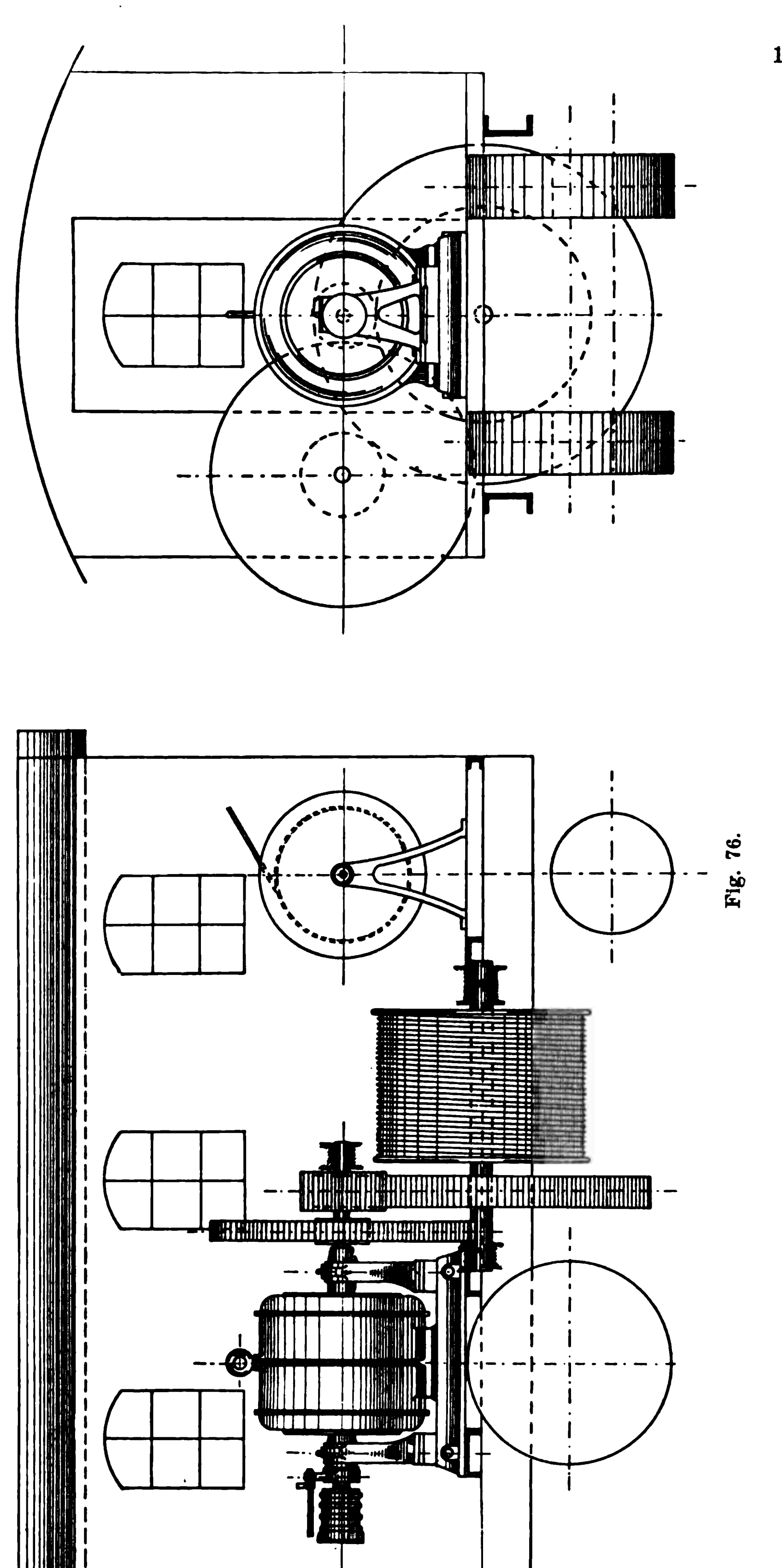


Fig. 76.

Sowohl die Beleuchtung, als auch die elektrische Kraftübertragung bieten dem Landwirt aus naheliegenden Gründen viele Vorteile und Bequemlichkeiten. Die elektrische Beleuchtung vermindert die Feuergefährlichkeit; die elektrische Arbeitsverteilung ermöglicht ihm, viele Maschinen, die früher durch animalische Kraft ziemlich teuer betrieben wurden, mit Elektrizität und ohne erhebliche Kosten maschinell zu betreiben.

Auf grösseren Gütern wird der Elektromotor angewandt zum Antriebe von Dreschmaschinen, zum Betriebe von Pumpen, Aufzügen, Häkselschneidemaschinen, Ölkuchenbrecher und an vor der Hand noch wenigen Stellen auch zum Pflügen.

Der Betrieb der Dreschmaschinen durch Elektromotoren bietet nicht die geringsten Schwierigkeiten. Die üblichen fahrbaren Dreschmaschinen mit einem Kraftverbrauch, welcher zwischen 10 und 20 PS schwankt, besitzen eine verhältnismässig hohe Tourenzahl, sodass der normale schnelllaufende Elektromotor mit Riemenantrieb direkt mit ihnen verbunden werden kann. Der Motor wird dann fahrbar eingerichtet, d. h. auf einen Wagen gesetzt, zusammen mit seinem Anlasswiderstand, der nötigen Sicherheitsvorrichtung und einer Kabeltrommel; der Wagen muss natürlich vollständig geschlossen sein, damit beim Betriebe im Freien die Feuchtigkeit vom Motor und den übrigen elektrischen Apparaten ferngehalten wird.

Eins ist besonders hervorzuheben und zu beachten bei dem Betriebe dieser Dreschmaschinen, es ist nämlich die bekannte Thatsache, dass dieselben vielmehr Kraft verbrauchen, als gewöhnlich von den liefernden Firmen oder vom Besitzer angegeben wird. Dieser Umstand rührt daher, weil die noch in der Mehrzahl im Gebrauch befindlichen Dampfdreschmaschinen mit einer gerade unvernünftigen Überlastung der zugehörigen Lokomobilen arbeiten. So kann man häufig sehen, dass grosse Dreschkasten von 50 bis 60 Zoll, welche unter allen Umständen 20 PS konsumieren, durch 12 PS-Lokomobilen betrieben werden. Allerdings sind die Lokomobilen so gebaut, dass sie mit fast voller Füllung nahezu das Doppelte an Leistung zu ergeben vermögen, naturgemäss aber mit einem erheblich höheren Kohlenverbrauch für die Krafteinheit und Zeiteinheit, als bei normaler Belastung. Nicht selten findet man auch Landwirte, welche in richtiger Erkenntnis des Umstandes, dass die hohen Betriebskosten empfindlicher sind, als die etwas höheren Anschaffungskosten für eine 20 PS-Lokomobile, die letztere von vornherein anschaffen. Man hat dann die zunächst verblüffende Thatsache, dass die 20 PS-Lokomobile bei derselben Belastung wie die 12 PS-Lokomobile fast nur die Hälfte des Kohlenverbrauches zeigt, was natürlich seine Erklärung darin findet, dass die 20 PS-Lokomobile normal belastet ist und deshalb mit günstigster Füllung arbeitet. Es ist deshalb unter allen Umständen grosse Vorsicht nötig bei der Wahl der Elektromotoren für den Antrieb von grossen Dreschmaschinen. Verfasser wählt für diesen Zweck stets 20 PS-Elektromotoren, wenn die Dreschmaschine allein arbeitet; arbeitet sie dagegen in Verbindung mit einem Strohbinder oder einer Strohpresse, so ist mindestens ein 25 PS-Elektromotor zu wählen.

Wir brauchen an dieser Stelle uns hier nicht darüber zu verbreiten, dass für die Zwecke der Landwirtschaft das günstigste System der elektrischen Kraftverteilung das Drehstromsystem ist, weil die Elektromotoren dieses Systems starke Stösse und rauhe Behandlung besser auszuhalten vermögen, als Gleichstrommotoren.

Die übrigen Antriebe in der Landwirtschaft bieten kein nennenswertes Interesse mit Ausnahme des elektrischen Pflügens. Das letztere steckt aber noch in den Kinderschuhen und zwar nicht etwa wegen der Unfähigkeit der elektrotechnischen Industrie, sondern weil die mitbeteiligten Maschinenfabriken, welche die Zwischenglieder zu liefern haben, bisher noch nicht mit der nötigen Sachkenntnis an diese Aufgabe herangetreten sind. Das elektrische Pflügen geht vor sich genau in derselben Weise, wie die jetzige Dampfpflugarbeit. Bei weniger ausgedehnten Feldern wird man das Einpflugsystem anwenden, bei welchem der Elektromotor ein endloses Seil vorwärts und rückwärts bewegt und hierdurch den am Seile befestigten Kipppflug in Bewegung setzt. Bei räumlich weiter ausgedehnten Feldern greift man zum Zweimaschinensystem, wodurch man den Pflug von der einen Maschine feldaufwärts und von der anderen Maschine feldabwärts ziehen lässt. Auch hier unterschätzte man anfänglich den Kraftbedarf ganz bedeutend; es hat sich durch die Versuche, welche vor allen Dingen in sehr zweckmässiger Weise von der Zuckerfabrik in Klein-Wanzleben bei Magdeburg angestellt worden sind, erwiesen, dass bei der dortigen Bodenbeschaffenheit eine Motorleistung von 75 PS unbedingt Erfordernis ist, da nicht selten Überlastungen bis zu 100 PS vorgekommen sind. Wir können die Hoffnung hegen, dass die nächsten Jahre auch auf diesem Gebiete die Lösung der schwebenden Fragen bringen werden; der Hauptgrund, welcher der Entwickelung des elektrischen Pflügens hemmend entgegensteht, ist nach Ansicht des Verfassers weniger in der technischen Unzulänglichkeit des bis-

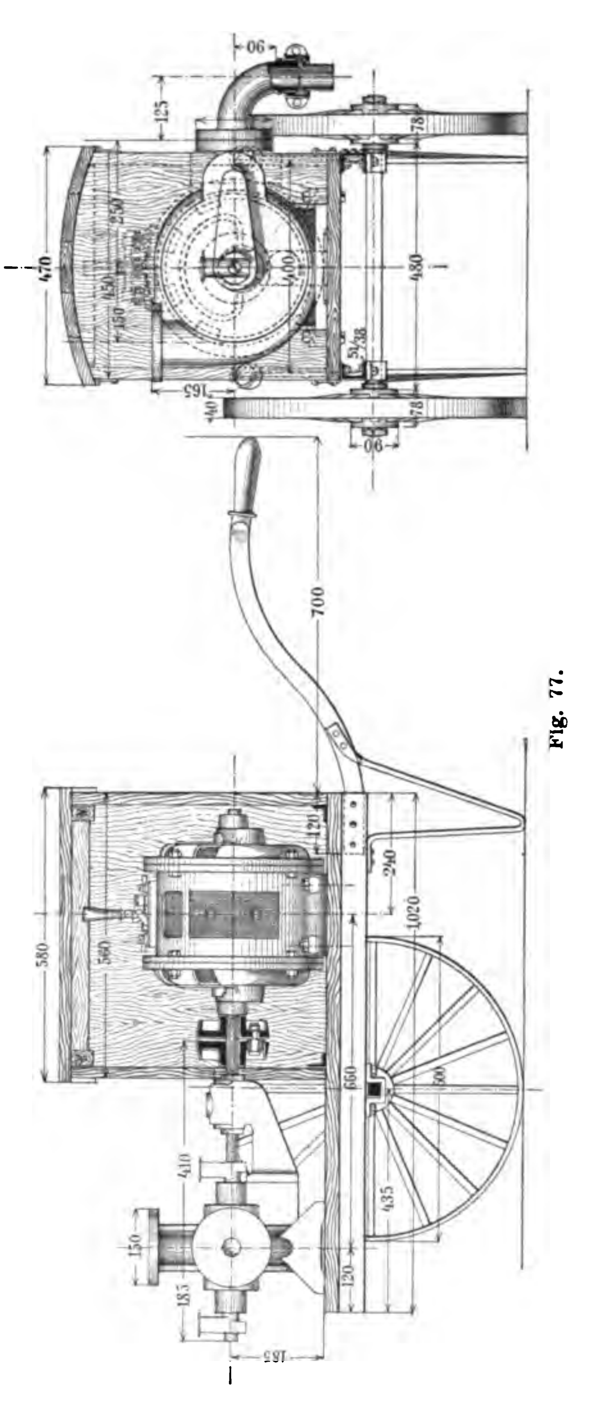



Fig. 77.

herigen Systems zu suchen, als vielmehr in dem Umstande, dass das jetzige Dampfpflügen von Leuten besorgt wird, welche im Besitze mehrerer Dampfpflüge befindlich, hieraus ihren Erwerb machen und sich deshalb naturgemäss gegen die neue Konkurrenz heftig wehren. Selbst auf grossen Gütern findet man selten Dampfpflüge im Besitz der Eigentümer des Gutes; die grössten Domänen lassen ihre Felder durch die oben erwähnten Dampfpflugbesitzer gegen Lohn pflügen.

Fig. 76 zeigt einen von der Magdeburger Elektromotorenfabrik entworfenen fahrbaren und zwar einen Drehstrommotor. Der Motor ist über den Hinterrädern des Wagens montiert und treibt mittels doppelten Vorgeleges eine Seiltrommel, auf der das den Pflug ziehende Stahlseil von 20 mm Durchmesser mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/sec. und einer maximalen Zugkraft von 3000 kg aufläuft. Die Seiltrommel ist möglichst tiefliegend angeordnet, um den Wagen möglichst stabil zu erhalten. Quer zur Seiltrommel finden wir auf der Wagenplattform noch eine Kabelwinde montiert, die für circa 200 m Leitungskabel bemessen ist. Die Seiltrommel ist, was in der Figur nicht ersichtlich, mit dem Zahnradvorgelege durch eine ausrückbare Kupplung verbunden, welche in ausgerücktem Zustande die Kraft des Motors mittels Schnecke und Schneckenrad auf die Hinterräder des Wagens wirken lässt, wodurch das allmähliche Vorschreiten des Wagens durch die Kraft des Motors ermöglicht wird.

Der Wagen selbst ist mit breiten im Umfange gerippten Rädern versehen, welche eine Vorwärtsbewegung desselben auch auf weichem Ackerboden zulassen. Die verdeckte Plattform des Wagens hat Raum für das Bedienungspersonal und die Anlass- resp. Messapparate. Vorliegender fahrbarer Motor eignet sich vermöge seiner Anordnung gleichmässig für das beim Dampfpflügen oder elektrischen Pflügen verwendeten Ein- oder Zweimaschinensystem.

## Rentabilität elektrischer Kraftanlagen.

Neben den Anschaffungskosten einer industriellen Anlage sind durchaus zu berücksichtigen die Betriebskosten derselben; sie spielen sogar eine grössere Rolle als die Anlagekosten, da einerseits die Rentabilität einer Anlage von ihnen abhängt, und in ihnen implicite auch die Anschaffungskosten in Form der Abschreibungen und Verzinsung enthalten sind.

Es ist deshalb angebracht, dieser Frage ein besonderes Kapitel zu widmen.

Der Ausdruck „Rentabilität" kann im Sprachgebrauch zweierlei bedeuten, je nach dem Zwecke, welchem eine elektrische Anlage dient. Eine elektrische Überlandcentrale z. B. ist ein Erwerbsunternehmen, bei welchem es sich lediglich darum handelt, durch den Verkauf elektrischen Stromes an Konsumenten ein bestimmtes Anlage- und Betriebskapital möglichst hoch zu verzinsen. Hier besteht also die Rentabilität in der erreichten Dividende.

Anders liegt der Fall, wenn eine Kraftübertragung nicht direkt Erwerbszwecken dient, wie z. B. in dem Falle, dass der Besitzer einer Wasserkraft dieselbe durch elektrische Übertragung zum Betriebe seiner entfernten Fabrik benutzt. Eine solche Anlage wird als rentabel bezeichnet, wenn sie durch ihren Betrieb Ersparnisse gegenüber anderen Betriebsarten, z. B. Dampf, ermöglicht.

Beide Beispiele lassen erkennen, wie nötig es ist, sich vorher über die Rentabilität rechnerisch klar zu werden. Hierbei ist ohne Frage der künftige Besitzer der zweitbesprochenen Anlage im Vorteil: er weiss, was er mit der projektierten Anlage treiben will, kennt also Betriebsdauer und Belastung vorher genau.

Nicht so glücklich ist der Projekteur der Centrale: er muss mit Annahmen rechnen, die zwar auf Grund vorliegender Erfahrungen bei ähnlichen Werken und an der Hand von Konsumerhebungen recht erhebliche Wahrscheinlichkeit haben können, indessen doch positiv Sicheres nicht bieten.

Es sind mehrere Fragen, welche ziemlich genau klargestellt sein müssen, ehe eine Rentabilitätsberechnung angestellt werden kann. Wir wollen dieselben in der Reihenfolge betrachten, wie sie sich nacheinander und auseinander ergeben.

1) Die grösste gleichzeitige Belastung.

2) Brennzeit der angeschlossenen Lampen, Benutzungsdauer und Belastung der Motoren u. s. w.

3) Hieraus ergiebt sich die mittlere Belastung.

4) Anlage- und Verteilungssystem, Betriebspannung.

5) Anlagekosten.

6) Direkte und indirekte Betriebskosten.

7) Einnahmen.

ad 1) Die Maximalbelastung einer zu Beleuchtungs- und Kraftzwecken erbauten Centralstation tritt naturgemäss im Winter ein und zwar in den Nachmittagsstunden, in welchen der volle Elektromotorenbetrieb noch im Gange ist, während die eintretende Dunkelheit bereits zur Beleuchtung zwingt.

Die Maximalbelastung steht in einem bestimmten, durch die Erfahrung bekannten Verhältnisse zu dem Anschlusswerte aller installierten Lampen und Elektromotoren; sie beträgt beispielsweise bei Centralen mit bedeutenden Motoranschlüssen sowie bei Überlandcentralen etwa 65 % aller installierten Kilowatt.

ad 2) Die Brennzeit der angeschlossenen Lampen schwankt je nach dem Orte und dem Erwerbsstand der Bevölkerung ausserordentlich. Wenn wenig Luxusbeleuchtung in Frage kommt, wie z. B. in kleineren Städten, Ortschaften, auf dem Lande, so kann man annehmen, dass im Mittel alle Lampen jährlich 500 Stunden brennen; ebenso kann man voraussetzen, dass die angeschlossenen Motoren sämtlich im Mittel 1000 Stunden mit voller Belastung laufen. Hierbei setzt man füglich den Stromverbrauch von 20 Lampen gleich ein Kilowatt, den Stromverbrauch einer effektiven Motorpferdestärke zu 0,9 Kilowatt.

Bei der Berechnung der Leistung der Centrale sind die Verluste in allen Leitungsgruppen und eventuell in den Umformern zu berücksichtigen.

ad 3) Die mittlere Belastung ist nach dem Vorstehenden sehr leicht auszurechnen; es ist nötig, sie zu kennen bei Bemessung der Maschinensätze der Centrale, um den Betrieb möglichst ökonomisch zu gestalten.

ad 4) Nachdem über Maximalleistung und mittlere Beanspruchung der Anlage die Zahlen festliegen, kann man unter Berücksichtigung der Entfernung der einzelnen Konsumstellen über das System der Centrale (Gleichstrom oder Drehstrom, letzterer mit oder ohne Unterstationen) entscheiden. Bei grösseren Werken, wenn sie mit starkem Motorenbetrieb zu rechnen

haben, kommt nur Drehstrom in Frage. Überlandcentralen sind nur unter Anwendung von hochgespanntem Drehstrom ausführbar; auch sind in diesem Falle besondere Unterstationen mit Akkumulatoren (Überlandcentrale Crottorf) durchaus zu verwerfen, da sie die Rentabilität in Frage stellen durch die wesentlich erhöhten Betriebskosten. Der Hochspannungsstrom soll vielmehr lediglich, wie dies schon weiter oben auseinander gesetzt ist, durch Transformatoren auf die Gebrauchsspannung umgeformt werden.

Die Betriebspannung richtet sich nach den Entfernungen und der Belastung, welche übertragen werden soll, wobei der Spannungsverlust so ökonomisch sein muss, dass der in Geldwert ausgedrückte Leitungsverlust plus den Amortisationskosten der Leitung ein Minimum wird.

Aber nicht nur aus Gründen der Rentabilität muss der Spannungsverlust klein gehalten werden, sondern auch, weil es bei einer umfangreichen Anlage unmöglich ist, Ausgleichsleitungen anzuwenden, wie dies z. B. bei städtischen Gleichstromcentralen mit 10 bis 15 % Verlust in den Speiseleitungen wohl gemacht worden ist. Anlagen, wie wir sie hier im Auge haben, also Überlandcentralen grösserer Ausdehnung, erfordern eine einfache Leitungsführung ohne Ausgleichsleitungen und ohne Messleitungen, damit der Betrieb einfach und übersichtlich von der Centrale aus geleitet werden kann.

ad 5) Anlagekosten: Die Anlagekosten eines derartigen Werkes sind, nachdem die vier oben erwähnten Punkte klar gestellt sind, ohne weiteres mit ziemlicher Sicherheit zu schätzen. Natürlich wird man bei ausgedehnten Kraftverteilungen, wie wir sie neuerdings in den Überlandcentralen besitzen, sehr sorgfältig verschiedene Umstände berücksichtigen müssen.

Bei ausgedehnten Fernleitungen, zu deren Führung öffentliche Wege benutzt werden, wird die Trasse der Leitung öfters mit staatlichen Telephon- und Telegraphennetzen, mit Eisenbahn-Signalleitungen und auch mit privaten Starkstrom- und Schwachstromlinien in Konflikt kommen. Wir haben bei einer früheren Gelegenheit gesehen, dass im allgemeinen in der Rechtsprechung die Ansicht geltend ist, dass der zuerst Kommende der Berechtigte und der später Kommende der Verpflichtete ist; das will heissen, dass sowohl der Staat, als auch Private von einem später kommenden Ausführer mit Recht Vermeidung allzu grosser Nachbarschaft bezw. Umlegung der vorhandenen Leitungen auf Kosten des später Kommenden zu verlangen in der Lage sind.

Speciell die Postverwaltung hat besondere Vorschriften erlassen, deren Befolgung die Vorbedingung der Genehmigung elektrischer Fernleitungen seitens des Fiskus zu sein pflegt. Im Nachstehenden bringen wir eine derartige Zusammenstellung, welche von der Oberpostdirektion in Magdeburg verfasst worden ist.

1) Für die mit elektrischen Starkströmen zu betreibenden Anlagen müssen die Hin- und Rückleitungen durch besondere Leitungen gebildet werden. Die Erde darf als Rückleitung nicht benutzt oder mitbenutzt werden. Auch dürfen in Dreileiteranlagen die blank in die Erde verlegten oder mit der Erde verbundenen Mittelleiter Verbindungen mit den Gas- oder Wasserleitungsnetzen nicht erhalten, wenn die vorhandenen Reichstelegraphen- oder Fernsprechleitungen mit diesen Netzen verbunden sind.

2) Die Hin- und Rückleitungen müssen in so geringem, überall gleichem Abstande voneinander verlaufen, als dies die Rücksicht auf die Sicherheit des Betriebes zulässt.

3) An den oberirdischen Kreuzungsstellen der Starkstromleitungen mit den Reichstelegraphen- und Fernsprechleitungen müssen entweder die Starkstromleitungen auf eine ausreichende Länge — mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunktszwischenraum — aus isoliertem Drahte hergestellt werden, oder es müssen bei Verwendung blanken Drahtes Schutzvorrichtungen (geerdete Schutznetze u. s. w.) angebracht werden, durch welche eine Berührung der beiderseitigen Drähte verhindert oder unschädlich gemacht wird. Die Verwendung isolierten Drahtes für die Starkstromleitungen ist jedoch nur dann als ausreichender Schutz zu betrachten, wenn die normale Betriebsspannung 1000 Volt nicht übersteigt. Der Abstand der Konstruktionsteile der Starkstromanlage von den Schwachstromleitungen darf in vertikaler Richtung nicht weniger als 1 m, in horizontaler Richtung nicht weniger als 1,25 m betragen.

Die Kreuzungen haben thunlichst im rechten Winkel zu erfolgen.

4) An denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromleitungen neben den Schwachstromleitungen verlaufen und der Abstand der Stark- und Schwachstromdrähte voneinander weniger als 10 m beträgt, sind Vorkehrungen zu treffen, durch welche eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen sicher verhütet wird. Beträgt die Betriebsspannung in der Starkstromanlage nicht mehr als 1000 Volt, so kann als Schutzmittel isolierter Draht verwendet werden. Von dieser Bedingung kann abgesehen werden, wenn die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen auch beim Umbruch von Stangen oder beim Herabfallen von Drähten ausschliessen.

5) Die isolierende Hülle des nach Punkt 3 und 4 zu benutzenden isolierten Drahtes darf nicht durchschlagen werden, wenn sie einer Spannung ausgesetzt wird, welche das Doppelte der Betriebsspannung beträgt.

6) Die unterirdischen Starkstromleitungen müssen thunlichst entfernt von den Reichstelegraphen- und Fernsprechkabeln, womöglich auf der anderen Strassenseite, verlegt werden.

Werden Reichstelegraphen- oder Fernsprechkabel von Starkstromkabeln gekreuzt, oder verlaufen die Kabel in einem seitlichen Abstande von weniger als 50 cm nebeneinander, so müssen die Starkstromkabel auf der den Schwachstromkabeln zugewendeten Seite mit Cementhalbmuffen von wenigstens 6 cm Wandstärke versehen und innerhalb dieser in Wärme schlecht leitendes Material (Lehm und dergleichen) eingebettet werden. Die Muffen müssen 50 cm zu beiden Seiten der gekreuzten Schwachstromkabel beziehungsweise bei seitlichen Annäherungen ebenso weit über den Anfangs- und Endpunkt der gefährdeten Strecke hinausragen.

Ausserdem müssen an denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromkabel unterhalb der Schwachstromkabel, letztere kreuzend, oder in einem seitlichen Abstande von weniger als 50 cm neben ihnen verlegt werden sollen, die Schwachstromkabel zur Sicherung gegen mechanische Angriffe mit zweiteiligen eisernen Rohren oder Muffen bekleidet werden, die über die Kreuzungs- und Näherungsstelle nach jeder Seite hin etwa 1 m hinausragen.

Von diesen Schutzvorkehrungen kann Abstand genommen werden, wenn die Starkstromkabel oder die Schwachstromkabel sich in gemauerten oder in Cement- u. s. w. Kanälen von mindestens 6 cm Wandstärke befinden.

7) Zum weiteren Schutze der Reichstelegraphen- und Fernsprechanlagen, insbesondere zur thunlichsten Verhütung von Brandschäden für den Fall des

Übertritts stärkerer Ströme aus den Starkstromleitungen in die Schwachstromleitungen werden in letztere Schmelzsicherungen eingeschaltet. Die Einschaltung wird von der Reichstelegraphenverwaltung bewirkt werden.

8) Sind infolge des parallelen Verlaufs der beiderseitigen Anlagen oder aus anderen Ursachen Störungen der Telegraphen- oder Fernsprechleitungen durch Induktion oder Stromübergang zu befürchten oder treten solche Störungen auf, so sind im Benehmen mit der Reichstelegraphenverwaltung geeignete Massnahmen zur Beseitigung der störenden Einflüsse zu treffen.

9) Falls die vorgesehenen Schutzmassregeln nicht ausreichen, um Unzuträglichkeiten oder Störungen für den Telegraphen- oder Fernsprechbetrieb fernzuhalten, sind im Einvernehmen mit der zuständigen Oberpostdirektion weitere Massnahmen zu treffen, bis die Beseitigung der Unzuträglichkeiten oder der störenden Einflüsse erfolgt ist.

10) Falls Fehler in der Starkstromanlage zu Störungen des Telegraphen- oder Fernsprechbetriebes Anlass geben, muss der Betrieb der Starkstromanlage in solchem Umfange und solange eingestellt werden, wie dies zur Beseitigung der Fehler erforderlich ist.

11) Spätere wesentliche Veränderungen oder Erweiterungen der Starkstromanlage sollen im Einvernehmen mit der kaiserlichen Oberpostdirektion ausgeführt werden. Die Unternehmer verpflichten sich, der genannten Behörde von derartigen Plänen rechtzeitig vorher Kenntnis zu geben.

Aus allem geht hervor, dass man bei den Anlagekosten von den ausgedehnten Fernleitungsnetzen besondere Posten einsetzen muss für die Verlegung von Telephon- und Telegraphenleitungen, für Schutznetze bei Wegübergängen, für unterirdische Kabelführung bei besonders schwierigen Stellen u. s. w. Unter Umständen werden diese Posten nicht unbeträglich sein; sie können mit Leichtigkeit bei einem Fernleitungsnetz von etwa 100 km einfacher Länge den Betrag von 50 000 Mark überschreiten und sind daher sehr wohl imstande, auf die Rentabilität einen Einfluss auszuüben.

Man darf nun ein Elektrizitätswerk für Kraft- und Lichtverteilung weder zu klein, noch zu gross beginnen und zwar aus folgenden Gründen:

Ein solches Elektrizitätswerk darf nicht zu klein sein, weil sonst die Gefahr besteht, dass es durch die bekanntermassen in den ersten Jahren häufigen Anmeldungen sehr bald überlastet wird; infolge davon müssten sehr bald Maschinenanlage und Leitungsanlage vergrössert werden, und das Werk käme niemals aus der Bauperiode heraus, würde stets an baulichen Veränderungen leiden und käme zu keiner ruhigen Entwickelung. Hierdurch würde natürlich die Rentabilität ganz bedeutend in Frage gestellt werden, weil zudem viele kleine Maschinen bedeutend mehr an Bedienung, Dampf und Öl verbrauchen, als das Äquivalent an grossen Maschinen.

Andererseits darf auch ein solches Elektrizitätswerk nicht etwa von vornherein für eine Leistungsfähigkeit eingerichtet sein, welche voraussichtlich erst in einigen Jahren erreicht werden kann. Es braucht nicht besonders nachgewiesen zu werden, dass dann die höheren Anlagekosten durch die vermehrte Amortisation und Verzinsung ebenfalls den Reingewinn in Frage stellen müsste.

Man wird deshalb bei der Projektierung von Kraft- und Lichtwerken von dem angemeldeten Konsum ausgehen, in der unter 1, 2 und 3 beschriebenen Weise die maximale und die durchschnittliche Belastung ermitteln und wird nun so projektieren, dass für den ersten Ausbau des Werkes die

Maschinenanlage und die Kesselanlage sowie vorkommenden Falls auch die Transformatorenanlage diesen Bedingungen entspricht; das Leitungsnetz wird man allerdings zweckmässig von vornherein für die später mit einiger Sicherheit zu erwartende höchste Belastung ausführen.

Die Maschinenanlage wird man so dimensionieren, dass möglichst zwei gleich grosse Dampf- und Dynamomaschinen im ersten Ausbau aufgestellt werden, damit im zweiten Ausbau das Hinzufügen einer Maschine, im höchsten Falle zweier Einheiten zur Vervollkommnung des Werkes ausreichen.

ad 6) Direkte und indirekte Betriebskosten: Die Betriebskosten eines Kraft- und Lichtwerkes setzen sich zusammen aus der Verzinsung und Amortisation des Anlagekapitals einerseits und aus dem Aufwand für den Betrieb andererseits.

Man wird darauf hingeleitet, infolgedessen zwei verschiedene Arten von Betriebskosten zu unterscheiden, nämlich erstlich solche Betriebskosten, welche unabhängig sind von der Anzahl der geleisteten Kilowattstunden, und zweitens solche, welche direkt abhängig sind von der Anzahl der abgegebenen Kilowattstunden.

Unter den unabhängigen Betriebskosten ist zunächst zu erwähnen die Verzinsung des Anlagekapitals. Üblicherweise setzt man diese Verzinsung mit 4 % ein.

Des weiteren ist die Amortisation oder Tilgung des Anlagekapitals einzusetzen; diese Tilgung besteht in den Abschreibungen von dem Werte der Anlage, welche in der Bilanz eines jeden Jahres erscheinen und allgemein dem Belieben der Gesellschaft oder des Privatmannes überlassen sind, welcher die Anlage besitzt. Indessen sind hier im Laufe der Jahre bestimmte Normen herausgebildet worden, nach welchen man vom Maschinenkonto 5 bis 10 % jährlich zu tilgen pflegt, vom Leitungsnetz 3 bis 5 %, von den Gebäuden 2 %, vom Grundstück bekanntlich nichts. Natürlich wird einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der notwendigen Abschreibungen die Dauer der Konzession ausüben; grosse Werke, wie Überlandcentralen zum Beispiel, werden von den Landkreisen auf eine bestimmte Reihe von Jahren mit dem Rechte der Benutzung öffentlicher Wege und der alleinigen Stromabgabe ausgestattet; diese Zeitdauer der Konzession wird natürlich in erster Linie bei der Bemessung der Tilgungsquoten zu berücksichtigen sein.

Ebenfalls zu den unabhängigen Betriebskosten gehört die Unterhaltung der Anlage; hierunter verstehen wir etwaige Reparaturen und Neuanschaffungen. In ordnungsgemäss und geschickt geführten Betrieben darf man annehmen, dass für die Unterhaltung der Anlage eine Summe von 3 % des gesamten Anlagekapitals reichlich genügend ist.

Fernerhin kommen in Betracht die Gehälter der in der Anlage thätigen Beamten und die Löhne des Arbeiterpersonals; hierüber bestimmte Ziffern zu geben, ist kaum möglich; doch liegt es auf der Hand, dass der Posten für diese Ausgabe relativ kleiner wird bei grösseren Werken.

Ferner ist noch ein besonderer Posten einzusetzen für Geschäftsunkosten, worunter man Bureaubedarf, Drucksachen, Annoncen und die verschiedenen Versicherungen und Steuern zu verstehen hat. Auch hierüber lässt sich eine bestimmte Ziffer nicht angeben. Dieselbe ist indessen leicht an Hand des Anlagekapitals und an Hand des Postens für Gehälter und Löhne einwandsfrei festzustellen.

Bei Drehstrom- und Wechselstromkraftverteilungen, welche über viele Transformatorenstationen verteilt sind, kommt noch ein besonderer unabhängiger Verlust zu den bis jetzt genannten hinzu; es ist dies der Hysteresisverlust der angeschlossenen Transformatoren. Die Transformatoren haben bekanntlich bei der fortwährenden Ummagnetisierung ihres Eisengestelles nicht zu unterschätzende Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme. Diese Verluste sind unabhängig von der Belastung des Transformators, sie sind in gleicher Höhe vorhanden, ob der Transformator Strom abgiebt oder ob er unbelastet ist. Man wird sie deshalb unter die unabhängigen Betriebskosten rechnen und zwar bei gut dimensionierten Transformatoren mit 1 bis 2 % der Kapazität.

Wir wenden uns zu den abhängigen Betriebskosten. Diese bestehen lediglich im Verbrauch an Kohlen, Öl und Putzmaterial.

Der Kohlenverbrauch ist natürlich in weiten Grenzen abhängig von der Güte der zur Verwendung gelangenden Kessel und Dampfmaschinen und Dynamoanlage, ferner abhängig von dem Verluste, welcher eintritt von dem Punkte, wo der erzeugte Strom die Dynamomaschine verlässt, bis zur Konsumstelle, wo er verbraucht wird. Es haben also auf die abhängigen Betriebskosten der Nutzeffekt der Erzeugungsanlage und der Nutzeffekt der Leitungs- und Transformatorenanlage einen besonderen Einfluss.

Dass sich die abhängigen Betriebskosten bei Wasserkraftanlagen natürlich sehr einfach und vor allen Dingen sehr billig gestalten, bedarf keiner näheren Darlegung.

ad 7) Einnahmen: Dieser Punkt, ohne Zweifel der wichtigste für die ganze Rentabilitätsberechnung, ist auch zu gleicher Zeit der unsicherste Faktor in der ganzen Kalkulation. Man besitzt eine grosse Reihe von Erfahrungszahlen aus kleinen und grossen Werken, welche einen guten Anhalt dafür bieten, wie gross die Einnahmen für eine Lampe und für eine Pferdestärke pro Jahr sind. Diese Erfahrungszahlen sind im allgemeinen allen künstlich herausgerechneten Einnahmeziffern vorzuziehen. So findet man beim Vergleich grosser und kleiner Anlagen, dass man mit einer Jahreseinnahme von mindestens 10 Mark für jede angeschlossene Glühlampe und ebenso mit einer Jahreseinnahme von 100 Mark für jede angeschlossene Pferdekraft eines Elektromotors mit ziemlicher Sicherheit zu rechnen vermag. Vornehmlich wird man mit diesen Ziffern da rechnen können, wo es sich nicht um Werke in grossen Städten handelt, wo also die Luxusbeleuchtung weniger, als die notwendige Beleuchtung und der notwendige Kraftbetrieb in Frage kommen. Die Jahreseinnahme genau rechnerisch zu verfolgen, ist unmöglich, weil man sich selten ein Bild davon machen kann, mit wieviel Brennstunden man rechnen kann. Es ist deshalb gut, die unter 2 ermittelten Brennzeiten und die Benutzungsdauer der Elektromotoren wohl zu verwenden zur Berechnung des Kohlenverbrauches der Kessel, es ist aber nicht vorteilhaft und jedenfalls keine sichere Bürgschaft für eine einwandsfreie Rentabilitätsberechnung, diese Ziffern zu verwenden, um nun unter Zugrundelegung des bekannten Strompreises die Einnahmen zu kalkulieren.

## Schlusswort.

Hiermit sind wir am Ende unserer Ausführungen angelangt. Das ganze Gebiet der elektrischen Arbeitsverteilung in dem Rahmen eines Bandes zusammen zu fassen, haben wir unter Auferlegung der notwendigen Beschränkungen versucht. Wenngleich mehrere Gebiete sowohl im ersten Teile, welcher über die Elektromotoren selbst handelte, als vielleicht noch mehr im zweiten beschreibenden Teile fortgelassen worden sind und fortgelassen werden mussten, so hofft der Verfasser doch immerhin, in der vorliegenden Arbeit einen zusammenfassenden Überblick über den Standpunkt einerseits der jetzigen Elektromotortechnik, andererseits den augenblicklichen Standpunkt der elektrischen Kraftverteilung auf den verschiedenen Gebieten des menschlichen Kulturlebens gegeben zu haben. Dass die kommenden Jahre grosse und nutzbringende Erfindungen im Bau von Elektromotoren bringen werden, dürfte billig bezweifelt werden, da wir im grossen ganzen nachgewiesen zu haben glauben, auf wie hoher Stufe der Bau von Gleichstrom- und Drehstrommotoren heute bereits angelangt ist. Nicht zu bezweifeln aber ist, dass die Anwendung der elektrischen Arbeitsverteilung noch auf vielen Gebieten möglich ist, und dass sie sich daher noch bedeutend mehr im Laufe der Jahre ausdehnen wird. Wie bereits im Anfang unserer Schrift ausgeführt, berechtigt die elektrische Beleuchtung nicht mehr zu so kühnen Hoffnungen, wenn nicht noch ganz bedeutende Erfindungen auf dem Gebiete der Lampentechnik ihr die Wege ebenen; heute schon ist es nicht möglich, in einer rationell betriebenen Centrale die Brennstärke einer 16 kerzigen Glühlampe erheblich billiger, als zu zwei Pfennigen zu verkaufen. Dagegen ist es heute bereits durchgeführt, dass die Pferdekraftstunde des elektromotorischen Betriebes wenig mehr als 10 Pfennige kostet, ein Preis, der im Vergleich mit anderen Motoren kleinerer Leistungen sehr konkurrenzfähig zu nennen ist.

Der Schwerpunkt unserer Entwickelung auf dem Gebiete der elektrischen Kraftverteilung wird zukünftig, abgesehen von den mächtigen Centralen grosser Stahlhütten und Bergwerke, vor allen Dingen auf den Überlandcentralen grösserer Ausdehnung beruhen. Diese Überlandcentralen werden nicht nur den Städten, sondern auch den kleinsten Ortschaften und damit dem minder bemittelten Teile der Bevölkerung den Strom zur Verfügung stellen, ihm eine grosse Menge der Annehmlichkeiten bieten, welche sonst nur innerhalb der grösseren Städte geboten werden; die Überlandcentralen werden daher an ihrem Teil mitarbeiten an der Kulturaufgabe unseres Jahrhunderts, und dies wird mit einer der schönsten Erfolge unserer Elektrotechnik sein.

---

# Namen- und Sachregister.

**(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)**


Abnahmeprüfung 43.
Ankerdurchmesser 31.
Ankererwärmung 36, 37, 42.
— Gründe der 47.
Ankerlänge 32.
Ankerrückwirkung 28.
— Mittel zur Verhinderung der 29.
— Berechnung der 31.
Ankerverluste 36.
Ankerwindungszahl 34.
Anlasser für Drehstrom 67.
Anlasserschaltung bei Nebenschlussmotoren 8.
Anzugskraft der Drehstrommotoren 69.
— der Hauptstrommotoren 17.
— der Compoundmotoren 23.
— der Nebenschlussmotoren 10.
Arbeitsübertragung 101.
Automatischer Wendeanlasser 160.

Behörden 112, 188.
Beispiel Drehstrom 80.
— Einphasenmotor 97.
— Gleichstrom 32.
Belastung, maximale, — bei Drehstrommotoren 69, 79.
— von Gleichstrommotoren 42.
Berechnung von Gleichstrommotoren 28.
— von Magnetspulen 37. 41.
Besondere Gleichstromschaltungen 24.
Bremsung von Gleichstrommotoren 42.
*Brown* 92, 107.

Capacität, flüssig 94.
— trockene 94.
Centriwinkel des Polschuhes 29.
Compoundmotor 23.
— Feldstärke beim 23.
— Tourenzahl beim 23.
— Anzugskraft beim 23.

*Dettmar* 50.
*Doliro-Dobrowolski, von* 55, 56, 66.
Drahtumspinnung 50.
Drehstrommotoren 55.
Dreieckschaltung 62.
Dreileiternetz zur Tourenregulierung 27.
Dreschmaschinen, elektrische 184.
Drosselspule 93.

Einphasenmotor 92.
Elektrischer Pflug 184.
Entwurf von Drehstrommotoren 70.
— von Gleichstrommotoren 28.
Erwärmung von Ankern 36, 37, 42, 47.
— von Spulen 40, 42.

Fahrbare Motoren 178.
Falsche Tourenzahl 51.
Fehler an Drehstrommotoren 91.
Feldstärke bei Nebenschlussmotoren 6.
— bei Hauptstrommotoren 16.
Feuchtigkeit 51.
*Fischer-Hinnen* 14, 18, 22, 36, 40, 48.
*Forbes* 136.
Funkenbildung 44.

Geschwindigkeitsregulierung 11, 20, 68.
Gesteinsbohrmaschinen 179.
*Glimmer* 50.

*Haselwander* 55.
Hauptstromkraftübertragung 18, 22, 104.
Hauptstrommotoren 16.
Hebezeugantriebe 150.
*Herschel* 134.
*Heyland* 73, 96.
Hilfsphase 92, 100.
— Methoden zur Erzielung einer 93.
Hysteresis 36, 47.

Isolation 50.

*Kapp* 28.
Kapselmotoren 176.
Kohlebürsten 46.
*Kohlrausch* 42.

Kollektormaterial 47.
Kondensator 93.
Kraftverteilungen 104, 110, 115, 122, 125, 128, 132, 133.
Kurzschlussstrom 79, 89.

Landwirtschaftliche Anlagen 184.
*Lasche* 164 ff.
Läuferschaltungen 66.
Leerlaufstrom 71. 89.

Magnetisierungsstrom 70, 89.
Manteldicke 33.
Maximalspannung 7, 18, 69.
Messung der Streuungskoeffizienten 76, 90.
Metallbürsten 45.
Mikanitleinen 50.
*Mordey* 29.

Nebenschlussdrahtdurchmesser 39, 41.
Nebenschlussmotoren 4, 108.
Niagarakraftverteilung 133.
*Niethammer* 150, 159, 160.
Nutenanordnung, Gleichstrom 35.
Nutenform 61.
Nutenzahlen 63.
Nutzeffekt 52.

Pflug, elektrischer 185.
Phasenabstand 57.
Phasenverkettung 59.
Phasenverschiebung 74.
Polschlitze 30.
Polschuhcentriwinkel 29.
Polschuherwärmung 49.
Polschuhhöhe 33.
Polwechselzahl 64.
— Abhängigkeit der Touren von der 64.
Primärstation 103.
Prüfung von Motoren 41, 88, 100.
Pumpenantriebe 147.

Regulierung der Tourenzahl 11, 20, 68.
Rentabilität elektrischer Anlagen 186.
Reversieren 14.
Riedler-Expresspumpe 147.
*Rowland* 136.

Sättigungsgrad 28, 35.
Schaltungen von Drehstrommotoren 56, 59, 60, 62, 63.
Schaltung von Einphasenmotoren 94.
*Schiemann* 22.
Schleppschiffahrt 145.
Schlüpfung 65, 91.
*Schulz* 31, 106, 160, 178.
Sehnenwicklung 29.
Selbstinduktion bei Nebenschlussmotoren 9.
*Sellers,* Dr. 134.
*Siemens, W. von* 181.
Spinnereianlagen 182.
Spulenwickelraum 34.
Stahlguss 40.
*Steinmetz* 48.
Sternschaltung 62.
Streuung 73.
Stromdichte 34.
*Swinburn* 53.

Temperaturmessung durch Widerstandszunahme 43.
*Tesla* 55, 136.
Thermometermessung 43.
*Thomson, William* 134.
*Thury* 106, 114.
Tourenregulierung 11, 20, 68.
Tourenzahl bei Nebenschlussmotoren 7.
— bei Hauptstrommotoren 16.
Transformator, Analogie des Drehstrommotors mit einem 72.
Transformatorstationen 111, 113.
Trockenofen 50.

Überlandcentralen 111, 187.
Überlastung 28, 69, 79.

Ventilatorantriebe 146.
Veränderung der Polzahl 25.
— des magnetischen Widerstandes 25.

Webereianlagen 182.
Wendeanlasser 160.
Werkzeugmaschinen 163.
Wirbelströme 48.
Wirkungsgrad 52.

Zweikollektormaschinen 26.

